

UNIVERSIDAD DE CÁDIZ

Escuela Internacional de Doctorado en Estudios del Mar

Comparativa entre el modelo tradicional de documentación arqueológica y la fotogrametría subacuática: un acercamiento práctico de los pecios Deltebre I y Cala Cativa I

Comparison between the traditional model of archaeological documentation and underwater photogrammetry: a practical approach to wrecks Deltebre I and Cala Cativa I

Trabajo Fin de Máster.

Máster Oficial en Arqueología Náutica y Subacuática.

Juan Mayoral Peñalva

Cádiz, 2017

Tutor/es:

Felipe Cerezo Andreo.

Gustau Vivar Lombarte.

Resumen

El objetivo del presente estudio es realizar una comparativa analítica entre el método tradicional de documentación arqueológica por medio de dibujo, y el empleo de la fotogrametría actual. Para ello se emplearán las planimetrías realizadas con el método tradicional con dibujo arqueológico, facilitadas por el *Centre d'Arqueologia Subaquàtica de Catalunya* (CASC) en los pecios Deltebre I y Cala Cativa I, y se compararán con sus respectivas fotogrametrías 3D generadas a lo largo de esta investigación. Para poder lograr dicha comparativa entre ambos métodos, se procederá a realizar un estudio de forma independiente en cada pecio, por medio de una comparativa visual por superposición, en la cual se cotejarán entre sí la fotogrametría digital y la planimetría tradicional generada para cada caso; y una comparativa métrica, donde se procederá a medir las planimetrías en cuestión, observando las diferencias métricas que pueda haber entre ambos procedimientos y el porcentaje de error.

Palabras clave: *Arqueología subacuática, dibujo tradicional, fotogrametría, comparativa, arquitectura naval.*

Abstract

The objective of the present study is to perform an analytical comparison between the traditional method of archaeological documentation, that is, the drawing of planimetries, and the current photogrammetry. For this purpose, planimetries carried out with the traditional method with archaeological drawings will be used, provided by Centre d'Arqueologia Subaquàtica de Catalunya (CASC) from the wrecks Deltebre I and Cala Cativa I, and they will be compared with their respective photogrammetries, obtained throughout this investigation. In order to achieve such a comparison between both methods, a study will be carried out independently in each wreck, by means of a visual comparison by superposition, in which the digital photogrammetry and the traditional planimetry generated for each case will be checked against each other. A metric comparison will also be performed, where the planimetries in question will be measured, observing the metric differences that may exist between both procedures and the percentage of error.

Keywords: *Underwater archaeology, traditional drawing, photogrammetry, comparison, naval architecture.*

*Como las gaviotas y las olas
nos encontramos y nos unimos.*

*Se van las gaviotas, volando,
se van rodando las olas
y nosotros también nos vamos.*

R. Tagore

*A mi abuelo, quien me
transmitió toda su pasión
por los barcos.*

INTRODUCCIÓN.....	xi
I. OBJETIVOS.....	1
II. METODOLOGÍA.....	4
2.1. ESTRATEGIA DE TRABAJO	4
2.2. PROBLEMÁTICAS PRINCIPALES DE ESTE ESTUDIO	5
III. LAS TÉCNICAS DE DOCUMENTACIÓN. EVOLUCIÓN DESDE EL DIBUJO ARQUEOLÓGICO A LA FOTOGRAMETRÍA DIGITAL	9
3.1. DOCUMENTACIÓN ARQUEOLÓGICA TRADICIONAL.....	9
3.2. DESARROLLO Y EVOLUCIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA	10
3.2.1. <i>Orígenes de la fotogrametría</i>	12
3.2.1.1. Metrofotografía	12
3.2.1.2. Fotogrametría analógica	17
3.2.1.3. Fotogrametría analítica	21
3.2.1.4. Fotogrametría digital.....	22
3.3. HISTORIOGRAFÍA: FOTOGRAMETRÍA EN ARQUEOLOGÍA	24
3.3.1. <i>Primeras investigaciones fotogramétricas aplicadas a la arqueología</i>	25
3.3.2. <i>Fotogrametría terrestre</i>	25
3.3.3. <i>Fotogrametría subacuática</i>	27
3.3.4. <i>Investigaciones en fotogrametría subacuática hasta la fecha</i>	29
IV. CASOS DE ESTUDIO.....	31
4.2. CALA CATIVA I	32
4.2.1. <i>Introducción del yacimiento</i>	32
4.2.2. <i>Campañas realizadas</i>	34
4.2.3. <i>Método de documentación</i>	38
4.3. DELTEBRE I	38
4.3.1. <i>Introducción del yacimiento</i>	38
4.3.2. <i>Campañas realizadas</i>	39
4.3.3. <i>Método de documentación</i>	41
V. REALIZACIÓN DE UNA COBERTURA FOTOGRAMÉTRICA SUBACUÁTICA CON UN OBJETIVO ANALÍTICO.....	43
5.1. MÉTODO DE DOCUMENTACIÓN FOTOGRAMÉTRICA	43
5.1.1. <i>Retos de la fotografía subacuática</i>	43

5.1.2. Equipo fotográfico	45
5.1.3. Calibración cámara	47
5.1.4. Cobertura fotográfica	49
5.1.4.1. Colorchecker	51
5.2. PROCESADO DE IMÁGENES	53
5.2.1. Equipo informático	54
5.2.2. Programario.....	56
5.2.2.1. Photoshop Camera RAW	57
5.2.2.2. Agisoft PhotoScan	58
VI. COMPARATIVA ENTRE DIBUJO TRADICIONAL Y FOTOGRAMETRÍA	62
6.1. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE CALA CATIVA I	62
6.1.1. Análisis de los resultados	70
6.2. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE DELTEBRE I	72
6.2.1. Análisis de los resultados	77
VII. PERSPECTIVAS DE FUTURO	79
VIII. CONCLUSIONES	82
ÍNDICE DE FIGURAS	86
ÍNDICE DE TABLAS	88
ÍNDICE DE GRÁFICOS	89
BIBLIOGRAFÍA.....	90
ANEXO	104

INTRODUCCIÓN

Los mares y océanos desde tiempos remotos han significado un nexo de unión para los pueblos, un puente de conexión abierto que cerraba distancias, abría rutas comerciales y nuevos mundos en el horizonte. La fascinación hacia el medio acuático ha sido algo común en muchos pueblos y culturas, aun hoy en día perdura en nuestro imaginario cultural esa atracción.

La disciplina arqueológica ha avanzado enormemente desde aquellos primeros pioneros e investigadores del siglo XIX, como Augustus Pitt-Rivers, Heinrich Schliemann o Flinders Petrie (Bass, 2011). En tiempos de un colonialismo imperante se lanzaron a la conquista del pasado humano, buscando un tiempo más brillante, adornado de tintes épicos, en la busca del origen o explicación de la propia existencia humana. La arqueología subacuática no quedó exenta de este tipo de hechos, se documentan intentos fallidos allá por el siglo XV, donde curiosos de la época intentaron llegar hasta dos pecios romanos que descansaban en el lecho del lago Nemi (Italia), y todo ello por medio del buceo en apnea (Ucelli, 1950, pp. 5-34; Bass, 2011).

Los arqueólogos han sido herederos del legado de esos primerizos pioneros, encargados de desentrañar y proteger los vestigios que nos ha brindado la historia de los antiguos pueblos, y por supuesto, ante todo de dejar constancia documental de todo lo que se halla. Es aquí donde recae la importancia de la labor arqueológica, en la recuperación, la interpretación y la documentación del pasado. La arqueología es una ciencia intrínsecamente destructiva, por tanto, debemos preservar el patrimonio arqueológico como un legado no sólo para los futuros investigadores sino también para la humanidad.

En los últimos cincuenta años la arqueología subacuática ha evolucionado enormemente. Este periodo de auge ha sido gracias al rápido avance tecnológico producido en la última década, el cual ha repercutido de forma definitiva en muchos aspectos de nuestra sociedad, y nuestra disciplina, que como ente vivo, no es ajena a estos avances, se ha visto beneficiada de un modo considerable. La principal evolución se dio con la invención en los años 40 del respirador *Aqua-Lung* por parte de los franceses Jacques-Yves Cousteau y Emil Gagnan (Bass, 2011; Drap, 2012), a esto se sumaron las mejoras en los equipos de buceo y la aparición de la fotografía aplicada al medio acuático. Este último hecho significó un paso importante para los investigadores a nivel documental, ya que el tiempo requerido para documentar en ocasiones era mínimo y se veía mermado según la profundidad.

La principal limitación en la arqueología subacuática se halla en el tiempo de inmersión, el cual viene condicionado de forma directa por la profundidad a la que se trabaje. A mayor profundidad menor es el tiempo que se puede emplear para trabajar

bajo el agua. Además, con el agravante que la lucidez del arqueólogo se ve ligeramente mermada por la presión atmosférica a la que es sometido bajo el agua.

La inclusión de la fotografía digital en los métodos de documentación y la posterior aparición de softwares rápidos e intuitivos que permitían aplicar métodos fotogramétricos, han supuesto una pequeña revolución y una gran ventaja, ya que permite la documentación en un breve lapso de tiempo. La extracción de una ortofotografía o un Modelo de Terreno Digital (MTD) del modelo 3D hace que sea factible integrar información detallada y precisa, en el plan de excavación arqueológica digital. El carácter visual del modelado de superficies tridimensionales ofrece posibilidades de producción superiores, que permiten una mejor documentación de las estructuras *in situ* para futuras investigaciones, además de una mayor participación y conciencia pública para el patrimonio arqueológico.

La arqueología ha evolucionado en los últimos años y se debe tener presente el hecho de que ante todo, es una ciencia interdisciplinar, que se nutre y se complementa de campos tan diversos como la geología, la antropología, la ingeniería o la estadística. Esta investigación en sí misma es una constatación de dicha interdisciplinariedad, y a través de las técnicas documentales tradicionales por dibujo y las digitales por fotogrametría digital, haremos un análisis tanto visual como métrico de ambas formas de documentación, la cuales tendrán como base los pecios Deltebre I y Cala Cativa I. Ante las necesidades que se requieren dentro del mundo arqueológico subacuático, como agilizar los procesos o solventar la escasez de tiempo, la idea principal es poder aportar un nuevo enfoque que haga cuestionar la necesidad de aplicar estos métodos de forma extensiva y dentro de un protocolo estandarizado.

I. OBJETIVOS

La introducción de la fotogrametría digital ha supuesto un paso importante, siendo una innovación necesaria dentro del registro arqueológico, pero sobre todo dentro del registro arqueológico subacuático. El arqueólogo subacuático se mueve en un medio que no le es favorable en muchas ocasiones, y dependiendo de la profundidad a la que se trabaje el tiempo es un bien muy preciado, y en ocasiones escaso. La aplicación del método fotogramétrico en el medio subacuático significó un cambio radical, permitiendo al investigador el poder valerse de una herramienta que le permite generar un gran volumen de documentación de una forma rápida y cómoda, empleando imágenes digitales y haciendo uso de estas para generar levantamientos 3D y ortofotos de los yacimientos en estudio.

La fotogrametría ha alcanzado estos últimos años un reconocimiento extendido entre la comunidad científico-arqueológica, generando a su paso una gran cantidad de información plasmada en artículos y congresos, hasta el punto de dedicar algunos de ellos exclusivamente a esta nueva disciplina. Se empieza a observar en estos últimos años una tendencia creciente a la aplicación de las técnicas fotogramétricas en el medio subacuático. Esto ha llevado a la aparición de nuevos estudios (*e.g.* Miñano *et al.*, 2012; Demesticha *et al.*, 2014; Balletti *et al.*, 2015, 2016; Yamafune *et al.*, 2016) que han empezado a mostrar resultados cada vez más interesantes.

Sería en este marco del bagaje o trasfondo del desarrollo a nivel técnico de la documentación arqueológica, donde se asientan los tres objetivos principales de este Trabajo Final de Máster, los cuales presento a continuación:

1. Comparativa entre las técnicas de documentación tradicional por dibujo y la técnica fotogramétrica aplicadas a los pecios Deltebre I y Cala Cativa I.

El primer objetivo de la investigación se focaliza en la comparación de ambos métodos de documentación, empleando como base analítica las planimetrías tradicionales a dibujo y la documentación fotogramétrica de los pecios Deltebre I y Cala Cativa I.

Para empezar, se realizará una comparativa de ambos métodos documentales empleando la superposición, es decir, desarrollar una comparativa visual que permita cotejar la planimetría tradicional y la fotogrametría digital. El procedimiento consistirá en utilizar la planimetría tradicional digitalizada en *Adobe Illustrator*, y sobre esta se superpondrá una planimetría dibujada a partir de una ortofoto mediante el uso del programa *Adobe Illustrator*. Tras la superposición de ambas planimetrías a modo de

calco, se procederá a hallar similitudes o coincidencias e intentar comprobar hasta qué punto estas se asemejan o difieren.

2. Comprobar el nivel de precisión métrica, tanto a nivel de planimetría tradicional como de las ortofotos generadas mediante fotogrametría digital.

Asociado al objetivo anterior, el siguiente paso se centraría en llevar a cabo una comparación entre las diferentes planimetrías de ambos pecios, pero en este caso se basaría en una comprobación de las concordancias métricas existentes, o inexistentes, entre ambas. Para este fin se emplearán sectores de interés específico en cada pecio, con ello buscamos poder hacer una comparativa más detallada.

Esta comparativa de concordancias métricas se realizará mediante un análisis estadístico de los resultados. Para ello se emplearía el paquete de software estadístico *MedCalc*, con el cual se calculará un Coeficiente de Correlación Intraclass (CCI), generando posteriormente los gráficos e interpretaciones precisas a dicho análisis. El objetivo último de este proceso era cuantificar la concordancia entre las diferentes mediciones e identificar cualquier diferencia sistemática entre las mismas, y de este modo comprobar el grado de precisión que ostentan ambos métodos y que porcentaje de error hay, si lo hubiese, para determinar cuál de ellos se ajusta más a la realidad arqueológica.

3. Valorar, en base a nuestros resultados, las perspectivas de futuro de nuestra investigación y de la fotogrametría digital aplicada a la arqueología subacuática. Y en última instancia, determinar si existe la necesidad de establecer unas pautas/protocolos para la realización de modelos fotogramétricos con una finalidad científica.

Por último, el tercer objetivo se centraría en valorar las perspectivas de futuro de nuestro estudio y de la fotogrametría digital en el ámbito de la arqueología subacuática, todo ello tomando como base los resultados obtenidos en nuestro estudio. Y a partir de estos resultados plantearnos si existe la necesidad de establecer unas pautas/protocolos para la realización de modelos fotogramétricos con una finalidad científica.

Actualmente no existe ningún estándar metodológico a nivel fotogramétrico aplicado al ámbito arqueológico que pauten un *modus operandi* concreto. A la hora de realizar modelos fotogramétricos en el registro arqueológico subacuático aparecen en ocasiones dilemas debido a las complejidades que implica la fotografía subacuática, ya que en un medio acuático contamos con factores tales como la visibilidad, la refracción

y la pérdida de color, entre otros. Por todo ello, sería interesante poder contar con un protocolo unificado que clarifique la labor de los arqueólogos subacuáticos en los procesos de documentación fotográfica y la posterior generación de ortofotos o levantamientos tridimensionales, estableciendo así unas pautas de actuación y facilitando el trabajo.

II. METODOLOGÍA

2.1. ESTRATEGIA DE TRABAJO

Para afrontar un trabajo de comparación entre ambos tipos de documentación necesitábamos cumplir dos requisitos iniciales, uno de ellos era poder hallar dos pecios que se ajustasen a las necesidades de nuestra investigación, estos debían estar documentados mediante dibujo tradicional, total o parcialmente. Como segundo requisito debían seguir en proceso de excavación, debido a que si el yacimiento se encuentra inactivo no podemos acceder al mismo, ya que seguramente este habrá sido cubierto para protegerlo de la erosión y agentes externos.

Afortunadamente, había dos yacimientos del ámbito catalán que cumplían dichas características, el yacimiento del pecio Deltebre I, un barco del siglo XIX, naufragado cerca de la desembocadura del río Ebro (Vivar y Geli, 2015b, 2016b); y el yacimiento de Cala Cativa I, un barco romano del s. I a.C. (Vivar y Geli, 2015a, 2016a). Ambos yacimientos conservaban parte de la arquitectura naval y se habían realizado planimetrías y/o secciones de forma tradicional mediante un cuadro de dibujo con cintas métricas, una plomada, papel poliéster sobre una hoja de papel milimetrado, lápiz y goma.

Una vez cumplidos estos requisitos necesitamos de una metodología que nos permita afrontar los análisis necesarios para responder las preguntas planteadas. Nuestra metodología se basó en los siguientes pasos:

1. Recopilación de toda la documentación arqueológica en dibujo tradicional de ambos navíos. En el caso de encontrarse en forma de borrador, es decir sin digitalizar, se procedió a la digitalización de las mismas por medio del software *Adobe Illustrator*.
2. Realización de una cobertura fotográfica de ambos pecios, y posterior procesado de las imágenes con el objetivo de generar un modelo fotogramétrico con el que poder comparar más tarde ambos métodos. La realización de las mismas se llevó a cabo junto con el equipo de investigación del CASC.
3. Posteriormente se procedió al análisis comparativo de cada pecio de forma independiente, cotejando entre sí la fotogrametría digital y la planimetría tradicional generada para cada caso. Se cotejaron tanto de forma visual, mediante la superposición de ambas, como de forma métrica. Tras esto, los

resultados de los análisis para cada pecio fueron plasmados de forma independiente, por un lado, mediante imágenes donde se mostraba la superposición de ambos métodos documentales en cada caso, y por otro mediante la creación de tablas en las que se podía observar las diferencias métricas entre ambos procedimientos y el índice de error total que se podía observar.

4. Por último, se realizó un análisis comparativo de los resultados mediante un análisis estadístico. Para ello se empleó el paquete de software estadístico *MedCalc*, mediante el cual se ha calculado un Coeficiente de Correlación Intraclass (CCI) y se generó una gráfica *Bland-Altman*. El objetivo de este proceso era cuantificar la concordancia entre las diferentes mediciones e identificar cualquier diferencia sistemática entre las mismas.

2.2. PROBLEMÁTICAS PRINCIPALES DE ESTE ESTUDIO

Durante el trabajo surgieron ciertas problemáticas, las cuales son inherentes a toda investigación. Los problemas más recurrentes en este caso se dieron en el momento de documentación fotográfica. Por un lado, la planificación para la toma de fotografías se tuvo que abordar de forma independiente en cada yacimiento, debido a las condiciones del medio en que se encontraban, como la profundidad, la visibilidad y las dimensiones de la parte del casco conservada en cada caso.

El pecio de Deltebre I, que se halla a 7 metros de profundidad cerca de la desembocadura del río Ebro, reposa sobre un fondo de arena y limos (Vivar y Geli, 2015b, 2016b). Este hecho implicaba que en muchas ocasiones la visibilidad se viera afectada por una gran cantidad de partículas en suspensión sobre el yacimiento, lo que hacía que la visibilidad fuera inferior a 1 metro de distancia. A esto se ha de sumar que se trata de un barco de unos 30 metros aproximadamente de eslora conservada por 9 metros de manga (Vivar y Geli, 2015b, 2016b), por lo que para realizar una cobertura fotográfica que fuese viable para realizar el estudio, se necesitaba que el yacimiento estuviera limpio de sedimento.

Como ya hemos mencionado, en el yacimiento existe una gran cantidad de partículas en suspensión en el agua, con lo cual, si iniciábamos la cobertura en la zona de popa al llegar a la mitad del navío, este ya estaría de nuevo cubierto por sedimento. Es por ese motivo que la estrategia que se planteó para solventar este problema fue la de dividir el barco en cuatro secciones. Cada día se realizaba la cobertura de una de las partes (si la visibilidad lo permitía), empezando por la proa, luego se pasaba a la sección

contigua y así sucesivamente, y finalmente se terminaba de fotografiar la zona de popa con el timón.

Cada sección, antes de realizar la cobertura, debía limpiarse y realizar un marcaje arqueológico de los elementos significativos de la arquitectura naval conservada. La limpieza y etiquetaje se hacía también en parte de la sección siguiente, para así poder solapar imágenes y que al programa le fuera más sencillo unir las diferentes secciones en el modelo final. Una vez limpio y etiquetado se procedía a la cobertura fotográfica, empezando por realizar algunas fotografías a una tabla de color¹, para que posteriormente se pudiera normalizar el color de las fotografías generando un filtro y aplicándolo al resto de fotografías de la sección.

Una vez las fotos estaban realizadas se descargaban en el ordenador y se procedía a editarlas. Primero se corregía el color y posteriormente se cargaban en el programa *Agisoft PhotoScan*. En este programa se calibraban para corregir la distorsión producida por la refracción, y se generaba un modelo 3D de baja calidad para comprobar que el programa reconocía las fotografías o si quedaba algún espacio sin cubrir del pecio. Todo este proceso se repetía en cada sección, y en la sección de popa además se emplearon algunos *targets*², para facilitar la tarea del programa a la hora de generar el modelo fotogramétrico debido a la complejidad de dicha sección.

Tras comprobar que cada sección era procesada correctamente, se procedió a la edición (corrección de color) y al procesado de todas las fotografías a la vez (un total de 6126 imágenes) para generar el modelo 3D. Con el modelo acabado se inició el estudio propiamente dicho, comprobando algunas planimetrías realizadas mediante el dibujo tradicional y la fotogrametría, así como realizando mediciones con el programa *PhotoScan* y comparando con las tomadas en el yacimiento *in situ* para ver el margen de error existente.

En el caso del yacimiento de Cala Cativa I, la planificación fotográfica fue otra, ya que el barco se encuentra en un fondo de arena y cascajo a unos 33 metros de profundidad (Vivar y Geli, 2015a, 2016a). Tiene unas dimensiones más reducidas, de entre 7-9 metros aproximadamente de eslora por unos 3 metros aproximadamente de manga (Vivar y Geli, 2015a, 2016a). Esto implicaba que solamente era necesario realizar una cobertura fotográfica.

Para ello, en este yacimiento, se limpió de sedimento toda la madera, se marcaron las cabillas, y se etiquetaron las cuernas, tablas del forro y la quilla. También se colocaron *targets* perimetrales para facilitar la tarea de reconocimiento del programa

¹ El uso de las tablas de color se tratará más adelante en la sección V, donde abordaremos la realización la cobertura fotogrametría subacuática.

² Marcadores empleados para facilitar el reconocimiento de puntos al generar un modelo 3D.

y se procedió a la cobertura. Al igual que en el Deltebre I, se fotografió primero la tabla de color y posteriormente se realizaron el resto de las fotografías.

Del mismo modo que en el otro yacimiento, se hizo una primera prueba sin las imágenes filtradas, para ver si el programa reconocía todas las fotografías. Al ser positivo el resultado se procedió a corregir el color a todas las fotografías (unas 644 imágenes), se volvieron a cargar en *PhotoScan*, se calibraron y se procedió a generar el modelo en alta calidad. Una vez generado se escaló y se procedió a realizar las pruebas comparando los dibujos obtenidos, esta vez en unas cuadernas determinadas que habían sido dibujadas sus secciones y tomado medidas de estas en *PhotoScan* para ver el porcentaje de error que existía.

Otras circunstancias que perjudican en las investigaciones arqueológicas, en este caso centradas en pecios a nivel documental métrico y visual, es la problemática en la conservación de la madera. Tanto Deltebre I, como Cala Cativa I, se han ido erosionando a lo largo de los años, es un proceso lento e inevitable, que en cierto modo se ha hecho notar también en los análisis fotogramétricos debido a la degradación de la madera de los pecios. Esta degradación puede inferir en las mediciones y crear un porcentaje de error más elevado del que debería mostrar.

El principal agente que provoca deterioro de forma rápida en la madera es el conocido como *Teredo navalis*, también denominado broma (Mann *et al.*, 1985; Hoppe, 2002). Es una especie de molusco bivalvo que se alimenta de madera construyendo su hábitat en ella perforándola y creando galerías calcáreas (Méndez, 2003). Se alimenta de maderas depositadas en el lecho marino o que estén flotando. Vive en aguas saladas y no muy frías, por lo que en aguas poco salobres o dulces no sobrevive, por eso en maderas de río o mares como el Báltico no se ven afectadas (Méndez, 2003; Hoppe, 2002). Necesita oxígeno para su supervivencia, por lo que si la madera queda cubierta, por la arena o el cargamento, no puede afectarla (Mann *et al.*, 1985; Méndez, 2003). No obstante, la madera sumergida también sufre un proceso de degradación, pierde paulatinamente la celulosa que es substituida por moléculas de agua, esto hace que conserve su forma, pero pierda dureza.

En ambos casos, el tipo de madera favorece la perduración de esta en el medio marino, cuanto más dura sea, por ejemplo, madera de roble, más tardará en hacer mella el *Teredo* o la desaparición de la celulosa. Por el contrario, maderas como el pino, que son más blandas se degradan más rápidamente. Aun así, las maderas que entran rápidamente en un estado anaeróbico (cubierto por el cargamento y/o sedimentos) se conservan de forma óptima, debido a que el proceso de intercambio de celulosa y agua se produce más lentamente, y su estructura se conserva, ya que, tampoco es atacada por el *Teredo* (Hoppe, 2002; Méndez, 2003).

En el caso de uno de los pecios, el Deltebre I, hallamos una problemática en la conservación de su madera. Como hemos señalado este pecio se sitúa en el Delta del Ebro, actualmente este delta sufre un fenómeno de regresión debido a la construcción de presas en época contemporánea, estas frenan la aportación de sedimento fluvial en la desembocadura del Delta (Vivar *et al.*, 2014b, p. 280). Esto provoca que se genere una erosión del yacimiento debido a los agentes naturales y mecánicos.

No sólo el *Teredo navalis* es perjudicial para la madera, la acción antrópica también lo es. Un claro ejemplo sería la figura del expoliador, que únicamente se interesa en el valor lucrativo del objeto hallado, su valor económico, por lo que únicamente se centrará en la extracción del mismo o los mismos. Para dicha extracción no seguirá ninguna metodología arqueológica y aún menos tendrá cuidado de dañar el resto de los materiales. Otro gran enemigo es la pesca de arrastre, que con sus artes destruyen todo lo que hay en el lecho marino, con lo cual en el caso de existir un yacimiento no catalogado y que contenga restos de madera pertenecientes a un pecio es muy probable que destruya gran parte del mismo. Y, por último, señalar que obviamente los dragados también pueden destruir un yacimiento, o gran parte del mismo, si no se efectúa un correcto seguimiento.

III. LAS TÉCNICAS DE DOCUMENTACIÓN. EVOLUCIÓN DESDE EL DIBUJO ARQUEOLÓGICO A LA FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

3.1. DOCUMENTACIÓN ARQUEOLÓGICA TRADICIONAL

La arqueología como ciencia intrínsecamente destructiva necesita de un detallado registro (Wheeler, 1954), tanto de las actividades acontecidas dentro del yacimiento en cuestión como de la relación de estructuras u objetos hallados en el mismo.

La documentación arqueológica tradicional en sus inicios se realizaba básicamente mediante soporte físico, empleando el uso de dibujos como medio de registro gráfico para la documentación de las áreas excavadas, objetos hallados, etc. Si bien es cierto que a día de hoy se sigue empleando el método tradicional de dibujo, paulatinamente desde el siglo XIX la fotografía empezó a hacerse un hueco como complemento a este (González Reyero, 2001; Bohrer, 2011). De igual modo, el uso de esta fotografía acabaría derivando en el uso de la fotogrametría actual para la documentación de yacimientos.

Este tipo de técnica no digital no necesita una preparación previa antes de la documentación, como así sucede con la fotogrametría, y se lleva a cabo empleando materiales de bajo coste. De igual modo el proceso de registro documental de forma tradicional se genera en su mayor parte *in situ*, es decir, en el propio yacimiento donde es posible añadir anotaciones, detalles o escribir notas. En el caso de las imágenes obtenidas por fotografía y convertidas a fotogrametría, necesitan un montaje posterior y procesado de las mismas por ordenador (Gutehall, 2016).

No obstante, hay que tener presente que el dibujo es un método subjetivo e interpretativo y al dibujar, de forma consciente o no, elegimos qué datos consideramos relevantes o qué datos ignoramos (Avern, 2001). Hay que tener en cuenta que los métodos de documentación por dibujo tradicional en ciertos aspectos no alcanzan el grado de detalle que en ocasiones se necesita a la hora de documentar diferentes elementos patrimoniales (Avern, 2001; Adkins *et al.*, 2009). En el ámbito del dibujo en ocasiones se ignoran ciertos aspectos y se ilustran otros que si interesan al investigador o son llamativos. Este tipo de visión documental si no se complementa con el uso de métodos más imparciales como la fotografía, puede provocar cierto sesgo, que a la larga puede suponer un elemento perjudicial para futuros investigadores (Avern, 2001).

La precisión y exactitud en el caso del dibujo tradicional también supone un problema en ciertos aspectos, es un método mucho menos preciso y tiene gran posibilidad de error. El dibujo arqueológico como bien sabemos se ejecuta a mano y

mediante la técnica de reducción a escala de un original. Normalmente se suele emplear la escala 1:20 o 1:25 y, cuando se requiere mayor detalle, a 1:10 (Carandini 1997, p. 116; Caballero, 2006, p. 90). Muchos factores, como el grosor de las líneas trazadas, el dibujo a mano alzada empleado en ciertas partes, el proceso de entintado o procesado por ordenador, etc., pueden acarrear un sumatorio de errores de medición. Por lo tanto, debemos tener presente que existe un cierto margen de error en el empleo del dibujo tradicional, siendo casi imposible eliminarlo (Avern, 2001, p. 4).

La calidad de los dibujos es también un tema relevante, ya que ésta depende directamente de la habilidad que tenga la persona encargada de ejecutar los mismos. Con lo cual es un sistema que no nos va a brindar en todos los casos unos resultados con una calidad uniforme y del nivel esperado (Gutehall, 2016; Avern, 2001). Esto, en cierto modo puede suponer un problema, y también crear una disparidad documental si son varios los encargados de ejecutar el dibujo arqueológico. Por otro lado, el dibujo es también un proceso lento, y en teoría el arqueólogo debe registrar el máximo posible de evidencias, lo cual en ocasiones es algo difícil de procesar debido al poco tiempo y los recursos, que en ocasiones pueden ser un factor limitante.

Si bien el dibujo arqueológico adolece de ciertas carencias, éste aun así tiene cierto rango de fiabilidad (Carandini 1997, p. 116; Caballero, 2006), y hoy en día puede ser complementado mediante el uso de la fotografía y la fotogrametría (Avern, 2001). Trabajar simultáneamente con este tipo de técnicas es el camino más adecuado para hacer un registro detallado de todos los aspectos que encontramos en un yacimiento y así poder transmitir información completa y de calidad a los futuros arqueólogos que nos sucedan (Gutehall, 2016; Avern, 2001).

3.2. DESARROLLO Y EVOLUCIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA

El modelado tridimensional usando computadoras no es nuevo para la arqueología. La documentación arqueológica ha evolucionado notablemente desde los años sesenta. El uso de métodos no invasivos mediante la aplicación de las nuevas tecnologías ha facilitado enormemente el trabajo de campo. La evolución del campo fotográfico e informático supuso un punto de inflexión en las últimas décadas para el trabajo arqueológico y la labor documental.

Las primeras técnicas novedosas en documentación digital que se llevaron a cabo en arqueología fueron la fotografía, más tarde la fotogrametría terrestre y el uso de software asistido por computadora (CAD). Estas disciplinas fueron evolucionando hasta nuestros días con la aparición del modelado 3D y el uso de Modelos Digitales de Elevaciones, también conocido por sus siglas DEM (*Digital Elevation Model*) (Hageman y

Bennett, 2000) y la aparición de las tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG, o GIS en inglés) (Hageman y Bennett, 2000; Avern, 2001).

En esta última década la fotogrametría ha cobrado un papel importante en los procesos de documentación arqueológica. Fotogrametría significa literalmente ‘medir a partir de fotografías’, según la *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS) que define la disciplina del siguiente modo:

“Photogrammetry is the science and technology of extracting reliable three-dimensional geometric and thematic information, often over time, of objects and scenes from image and range data” (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016).

Por lo tanto, la fotogrametría nos dota de la capacidad de poder obtener las características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición) del elemento fotografiado, y de igual modo agiliza enormemente el método de documentación y estudio en el ámbito arqueológico. Esta ciencia nos permite mediante fotografías analizar ciertas estructuras, o elementos, e incluso posibilita el poder posteriormente al trabajo de campo hacer análisis y mediciones sin estar en el mismo, ni tener contacto físico directo con el objeto o estructura en cuestión (Charquero, 2016).

Este tipo de imágenes nos pueden aportar información de primera instancia del terreno y todo ello con información tridimensional del mismo. Con la actual aparición de la Realidad Virtual (VR), se están dando pasos agigantados encarados a crear modelos arqueológicos 3D de los yacimientos (Velios y Harrison, 2001), lo cual ha permitido en según qué casos crear incluso verdaderas colecciones y museos virtuales encarados a la gestión patrimonial vía internet (Payne, *et al.*, 2009; Avern, 2001).

El método fotogramétrico supone ciertamente un paso más allá en la documentación tradicional, puesto que permite un registro más amplio y en menos tiempo de los restos arqueológicos, cosa que es bastante útil si tratamos con excavaciones de urgencia o en ambientes subacuáticos (Bass, 2011) donde en ocasiones no se cuenta con el tiempo necesario para hacer un registro demasiado extenso. Otro rasgo interesante es que no es necesario un gran equipo de personas para llevar a cabo la labor de documentación, con un simple operario o dos se puede llevar a cabo de forma sencilla (Avern, 2001; Charquero, 2016), de igual modo los materiales necesarios no son excesivamente caros debido a que actualmente el material fotográfico como las cámaras digitales están disponibles a precios competitivos, incluso se encuentran modelos que alcanzan un alto estándar técnico y una buena resolución geométrica, y están disponibles a precios bajos (Linder, 2016).

De igual modo el empleo de un modelo 3D en el registro arqueológico supone una gran ventaja a nivel documental, sobre todo en el momento post-excavación, ya que permite reducir de forma drástica los tiempos de registro, elaboración de informes,

diagramas, y la creación de dibujos lineales empleando como base los modelos 3D haciendo uso de la vista cenital del mismo y el procesamiento de la imagen mediante el empleo de métodos de valor umbral, binarización de la imagen y la aplicación de filtro de gradiente para trazar un plano de excavación en cuestión de minutos (Avern, 2001, p. 4).

La fotogrametría digital en el campo de la arqueología se podría considerar, como bien dice Charquero (2010, p. 146), como el dibujo arqueológico 2.0. La documentación por medio de ortofotos es un complemento ideal para el dibujo arqueológico, si se logra crear un procedimiento estandarizado y eficaz de documentación fotogramétrica en las excavaciones se podría llegar a crear un sistema de registro total que facilitaría la transmisión del legado arqueológico (Avern, 2001; Linder, 2016).

3.2.1. Orígenes de la fotogrametría

El método fotogramétrico tiene más de un siglo de existencia, pero es patente que la fotogrametría empleada hace un siglo no era ni remotamente parecida a la actual (Van Damme, 2015; Bass, 2011). La introducción de las nuevas tecnologías en el ámbito arqueológico como el uso de equipos informáticos y fotográficos más ligeros, potentes y de uso sencillo, han ayudado a incorporar nuevas aplicaciones y conceptos a esta disciplina.

Siguiendo el esquema de Konecny (2014) en su obra '*Geoinformation: Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems*', se aprecian cuatro fases de desarrollo de la disciplina fotogramétrica a lo largo de la historia: metrofotografía (1850 a 1900), fotogrametría analógica (1900- 1960), fotogrametría analítica (1960-1990) y fotogrametría digital (1990-actualidad). Esta evolución es compleja debido a que, en su gran mayoría, todos los avances en este campo se han dado debido al desarrollo de otras áreas de conocimiento (Van Damme, 2015). Mediante estas fases intentaremos plasmar la complejidad de su desarrollo y la evolución del mismo hasta nuestros días.

3.2.1.1. Metrofotografía

A mediados del siglo XIX se produjo el primer avance que afectó de forma decisiva al desarrollo de la disciplina fotogramétrica: Nicéphore Niépce y Louis Daguerre, inventaron la fotografía. Con esto se posibilitó la proyección de forma óptica del terreno

en cuestión en un soporte de superficie plana, que recupera así la imagen mediante una emulsión fotográfica o por sensores digitales.

El uso de la fotografía en sus inicios se adaptó perfectamente a las necesidades requeridas en el campo arqueológico. Se necesitaba de una técnica que reflejase de forma más fidedigna y detallada la realidad, algo que el dibujo de campo no podía asumir completamente. Debido a esto la fotografía fue adoptada de forma temprana en el ámbito arqueológico, el siglo XIX fue testigo de las primeras fotos arqueológicas (ver *Fig.- 1* y *Fig.- 2*) retratando tanto a los primerizos arqueólogos como los yacimientos en cuestión (González Reyer, 2011). La fotografía supuso un gran avance en este ámbito, ya que permitió dejar constancia visual de forma mucho más rápida y cómoda de las fases de excavación, elementos arquitectónicos, objetos, etc.



Fig.- 1 Casa del Balcone Pensile, en Pompeya s. XIX. Fuente: fondo documental de la *Bibliothèque numérique patrimoniale du Service Commun de l'Université de Strasbourg*.



Fig.- 2 Pompeya s. XIX, fotografía del cuerpo de un infante conservado por la acción de las cenizas volcánicas. Fuente: fondo documental de la *Bibliothèque numérique patrimoniale du Service Commun de l'Université de Strasbourg*.

No obstante, los primeros intentos en el campo de la fotogrametría se dieron el año 1850, de la mano del ingeniero militar francés Aimé Laussedat (1819-1907) (Burtch, 2008; Van Damme, 2015), reconocido como el 'Padre de la fotogrametría' que empleó por primera vez el método fotogramétrico para obtener una cartografía del terreno. En sus inicios dibujaba perspectivas panorámicas del terreno a mano, mediante una cámara lucida basada en el prisma de Wollaston, a este método lo denominaría 'iconometría' (Van Damme, 2015; Konecny, 2014; Pozuelo *et al.*, 2004). En 1859 Laussedat pudo construir con ayuda de una óptica francesa afincada en París el primer fototeodolito conocido, el cual presentó en la Exposición de París en 1867 (Van Damme, 2015).

Laussedat emplearía fotografías para la elaboración de mapas cartográficos, el procedimiento fotogramétrico que utilizó se conoce actualmente como fotogrametría de intersección, este consistía en fotografiar un paisaje o un objeto, desde los dos extremos de una base. Este método está fundamentado en la observación de dos perspectivas de un mismo objeto, tomadas desde dos puntos de vista distintos convenientemente colocados. Lo que se busca es localizar la posición de las cámaras y algunos puntos de control en la escena que se está fotografiando para generar un levantamiento de mapas topográficos (Schwidefsky, 1943). Es decir, determinación de

coordenadas objeto, utilizando para ello la intersección espacial de rayos (líneas de fuga) a partir de un par de fotografías.

En el año 1858 el alemán Albrecht Meydenbauer, arquitecto de profesión, empezó a documentar edificios públicos mediante fotografía. Al igual que Laussedat empleó el procedimiento de intersecciones a partir de fotografías para el relevamiento de obras arquitectónicas y lo denominó fotogrametría. A Meydenbauer se le reconoce a día de hoy como el Inventor de la fotogrametría arquitectónica.

Se convirtió en la primera persona en adoptar la técnica fotogramétrica para propósitos del patrimonio cultural, y desarrolló la idea del *Denkmäler archiv* (Albertz, 2001), un archivo fotográfico donde los objetos más importantes del patrimonio cultural fuesen registrados en imágenes métricas de tal manera que incluso pudieran ser reconstruidos en casos de destrucción (Albertz, 2001; Burtch, 2008; Van Damme, 2015). Meydenbauer afirmaba que las imágenes obtenidas podían almacenar información con gran detalle y precisión de los elementos arquitectónicos, de igual modo estas fotografías eran útiles para realizar las mediciones de los edificios a través de las imágenes tomadas (Albertz, 2001) (ver Fig.- 3).



Fig.- 3 Catedral de Wetzlar fotografiada por Meydenbauer en 1858, extraída de Albertz (2001, p.7, Fig. 2).

Su método, técnica y el desarrollo de cámaras para el trabajo fotogramétrico supusieron un importante avance en esta disciplina. Las cámaras diseñadas por el arquitecto respondían a todas las necesidades que pudieran surgir durante el trabajo fotogramétrico, ya que, consideraba que las cámaras de la época no eran adecuadas para realizar este tipo de trabajos (Albertz, 2001) (ver Fig.- 4). Añadió una serie de soluciones técnicas como (Albertz, 2001, p. 20): Cuerpo robusto, lente montada

permanentemente; niveles de burbuja para nivelar la cámara; dispositivo para alinear el eje de la cámara; definición del plano de la imagen por un marco con marcas de referencia para los ejes de coordenadas; y por último la implementación de lentes de gran angular, como la *Pantoskop*, para cubrir los elementos arquitectónicos adecuadamente. Posteriormente Meydenbauer siguió trabajando en otros diseños de cámaras. En 1872 desarrolló dos nuevas cámaras usando un formato más pequeño de 20 cm x 20 cm. Una de ellas tenía una longitud focal de 12 cm y la otra de 21 cm. En estas cámaras las placas se cambiaban en cada exposición, para ello se utilizaba un pequeño contenedor hermético donde no podía penetrar el sol, para poder cambiar la película la cámara debía retirarse y meterse dentro de dicho contenedor. (Meyer, 1987).



Fig.- 4 Primera cámara fotogramétrica creada por Meydenbauer, extraída de Albertz (2001, p.7, Fig. 3).

Estas soluciones técnicas formaron los elementos básicos de todas las cámaras fotogramétricas que aparecerían posteriormente. A pesar de todos estos avances, Meydenbauer recorrió un largo camino hasta que su técnica estuvo desarrollada completamente, y de igual modo tuvo que salvar muchos obstáculos, críticas y detractores antes de que su idea fuera aceptada como un método de documentación y encontrara apoyo a nivel gubernamental.

Veinticinco años más tarde el Parlamento Prusiano, a la vista de los buenos resultados de la documentación fotogramétrica para el patrimonio cultural, dio una concesión de dinero para crear una institución dedicada a la fotogrametría en Berlín. El 1 de abril de 1885, se estableció el *Königlich Preußische Messbildanstalt* (Instituto Prusiano Real de Fotogrametría), el primer estudio fotogramétrico de la historia. Meydenbauer fue nombrado ministro de cultura de Prusia y director de la institución (Albertz, 2001).

Los procedimientos de Laussedat y Meydenbauer significaron todo un adelanto, no obstante, ambos tenían problemas con la identificación de puntos para el levantamiento de sus planos o edificios. Para Meydenbauer ésta era un caso menos grave debido a que un edificio podía aportar una cantidad de puntos reconocibles más alta, en el caso de la cartografía era algo más complejo de solventar (Meyer, 1987).

3.2.1.2. Fotogrametría analógica

La fotografía analógica se inició alrededor de los años 30. Es a partir de esta técnica cuando se empieza a emplear la estereofotogrametría. Esta técnica se basa en la visión estereoscópica, al observar dos imágenes de la misma escena, tomadas desde dos puntos de vista diferentes, se puede obtener una impresión tridimensional del paisaje u objeto observado. A partir de este principio de visión Sir Charles Wheatstone inventó en 1840 el estereoscopio. Este aparato funciona por medio de unos pequeños espejos, se observa a través de ambos dos imágenes, una para cada ojo, las cuales difieren en su punto de observación. Al mirarlas a la vez a través del aparato se produce una percepción tridimensional (Vargas, 1992). Por lo tanto, esta técnica es capaz de crear la ilusión de profundidad en una imagen bidimensional presentando una imagen ligeramente diferente para cada ojo, formándose lo que llamamos Modelo Espacial o Modelo Estereoscópico. En 1892 Franz Stolze también inventaría una técnica para generar percepción tridimensional valiéndose de fotografías estereoscópicas. Éste empleaba una ‘marca flotante’, en cada fotografía se marcaban dos puntos homólogos, ambas fotos se hacían coincidir en ese punto obteniendo la sensación de una marca flotante apoyada en el terreno y una visión tridimensional o con profundidad de la imagen (Konecny, 2014).

La estereofotogrametría se basa en un principio conocido como principio de Paralaje. Este se define como una variación aparente de la posición de un objeto, debido a un cambio en la posición del observador (Van Damme, 2015). Podemos comprobar esto de forma sencilla poniendo nuestro dedo pulgar delante de los ojos y moviendo la cabeza de lado a lado. Podremos observar como parece que el dedo se mueve con respecto a los objetos que tiene detrás. De igual modo, si cerramos de forma alternativa los ojos, es decir, primero el izquierdo y luego el derecho, podremos ver el mismo efecto, parecerá que el dedo a cambiado de posición, pero lo único que ha sucedido ha sido un desplazamiento de la posición de observación (ver *Fig.- 5*) (Van Damme, 2015, p. 7; Konecny, 2014m pp. 69–75, pp. 111–122). Este desplazamiento que observamos se debería también a este principio de paralaje. Nuestro cerebro recibe dos imágenes ligeramente diferentes de cada ojo, esto es lo que hace posible que podamos percibir la profundidad de nuestro entorno (Van Damme, 2015, p. 7; Konecny, 2014, pp. 69–75).

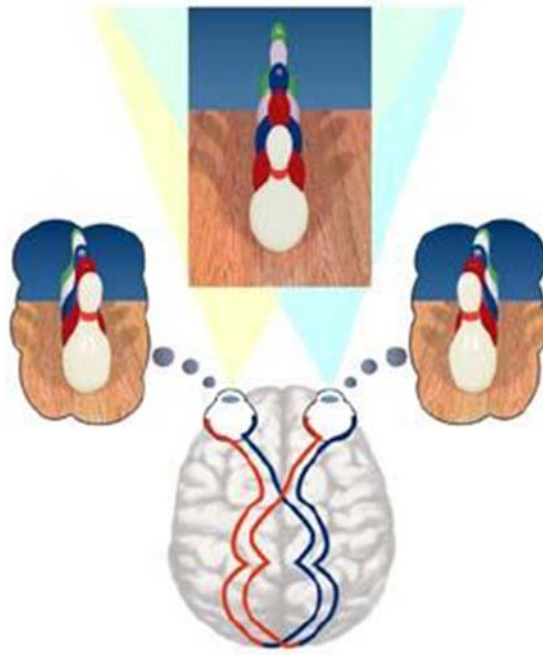


Fig.- 5 Ejemplo gráfico de la visión estereoscópica, extraída de Van Damme (2015, p.7, Fig. 4).

Con este amplio desarrollo de la estereoscopia y el desarrollo de la estereofotogrametría se inició una nueva etapa para la fotogrametría analógica. El principio de paralaje sería aplicado por ciertos investigadores, como en el caso del físico alemán Carl Pulfrich y el investigador sudafricano Henry George Fourcade en 1901. Ambos desarrollaron durante la misma época un dispositivo estereocomparador, hay ciertos debates sobre cuál de los dos fue el primero en aplicar el principio de paralaje a la fotogrametría. En cualquier caso, debido a las similitudes entre los dos dispositivos, la invención se denomina a veces colectivamente ‘Estereocomparador Pulfrich-Fourcade’ (Van Damme, 2015. p. 7; Konecny, 2014, p. 108).

El estereocomparador de Pulfrich-Fourcade pretendía solventar la dificultad planteada en la identificación de los puntos homólogos, y permitir la medición de coordenadas y paralajes con una alta precisión, no obstante, a pesar de que los resultados eran muy precisos aún se requería una gran cantidad de cálculos por parte del usuario, y sólo podía emplearse en imágenes terrestres (Van Damme, 2015, p. 7; Konecny, 2014, p. 108). La invención del dispositivo estereocomparador marcó también un punto de inflexión en la disciplina, ya que ayudó al desarrollo de otras innovaciones posteriores.

En el año 1907 Eduard von Orel desarrollaría un dispositivo de trazado mecánico basado en el estereocomparador de Pulfrich-Fourcade, el dispositivo era el estereoautógrafo de Zeiss-Orel (Konecny, 2014). Von Orel acopló al estereocomparador de Pulfrich-Fourcade un dispositivo mecánico de revolución de las ecuaciones de la fotogrametría de paralajes, las cuales transmitían los valores de las coordenadas de los puntos de los fotogramas (Lehmann, 1975, p. 116). En este caso el dispositivo mediante

regletas mecánicas que transmiten los valores de las coordenadas de los puntos de los fotogramas, ayudará al operario a dibujar la posición correcta del punto en el mapa. Este invento que mejoró notablemente el tiempo de ejecución y la realización de planos y levantamientos fotogramétricos, supondría toda una revolución ya que, permitió un flujo de trabajo más automatizado (Lehmann, 1975, pp. 116-118; Burtch, 2008, pp. 12-14; Konecny, 2014, pp. 108-109).

A partir de 1903 cambiaría el curso de la fotogrametría, este cambio vendría dado por la invención del avión motorizado de los hermanos Wright en 1903. Anteriormente se habían hecho intentos de llevar a cabo fotogrametría aérea, como en el caso de Laussedat que intentaría la toma de fotografías por medio aéreo mediante globos y cometas, pero dichos intentos no habían sido un gran éxito (Burtch, 2008; Van Damme, 2015).

La fotogrametría aérea en aquel entonces era un problema ya que, no se conocían ni las posiciones ni orientaciones de la cámara que tomaba las fotos, los fotogramas no estaban en planos verticales y tampoco los ejes eran paralelos (Konecny, 2014). En definitiva, la toma de fotos era muy precaria y el método de restitución no acababa de ser efectivo. No obstante, en 1897 el austriaco Theodor Scheimpflug (1865-1911), pionero de la fotografía aérea, sentó las bases de la idea de la *proyección doble*. Se basó en los conceptos previamente desarrollados por Jules Carpenter en 1901, su principio de la proyección doble propone que: “si dos planos son lo suficientemente prolongados, estos se deben interceptar en un plano perpendicular a dicho eje pasando a través del centro óptico de la lente” (Merklinger, 1996). Gracias a este principio de Scheimpflug se pudo desarrollar posteriormente los primeros restituidores analógicos aéreos, que solventarían la problemática de tomar fotografías en vuelo.

Durante la Primera Guerra Mundial se siguieron dando numerosos avances tanto en fotografía como en aviación (Konecny, 2014, pp. 109-110). La aparición de cámaras más potentes y aviones estables que eran cada vez más accesibles, propició que se explotase el potencial de la fotogrametría para la cartografía aérea tanto para fines civiles como militares (Van Damme, 2015; Konecny, 2014). Uno de estos avances se basaría en el principio de proyección doble de Scheimpflug, sería el Proyector Doble (Doppel projektor) inventado por Max Gasser en 1915. Este dispositivo permitirá orientar dos imágenes relativas entre sí con respecto al terreno. Carls Zeiss Company introdujo el invento en el mercado bajo el nombre de *Multiplex*, este puede considerarse como el primer restituidor apto para fotografías aéreas y con un buen funcionamiento (Van Damme, 2015).

Tras el final de la Primera Guerra Mundial la industria europea comenzó a construir dispositivos ópticos y mecánicos, en este momento los restituidores analógicos tendrán un gran impacto y una rápida difusión en la fotogrametría aérea, a pesar de su elevado coste se producirán un gran número de ellos para comercializarlos (Van

Damme, 2015). Algunos de los iniciadores también de este desarrollo en los restituidores analógicos fueron entre otros: R. Hegershoff en Dresden (1919), Bauersfeld de Zeiss en Jena (1921), E. Santoni y U. Nistri en Italia (1921), G. Poivilliers en Francia (1923) y H. Wild en Suiza (1926), con E.H. Thompson en Inglaterra y Bausch y Lomb en los EE.UU. (Konecny, 2014, p. 110).

En los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial se introdujeron nuevos instrumentos, que evolucionaron en el funcionamiento y siendo siempre más fáciles de usar o más económico que el anterior (Burtch, 2008, pp. 14-19; Konecny, 2010, pp. 110, 120, 123; Van Damme, 2015, p. 8). La modalidad analógica llegó a calar profundamente en la fotogrametría. Lo que se buscaba con estos nuevos inventos era ante todo evitar en gran medida los engorrosos cálculos de antaño, se buscaba una automatización de los mismos, evitar cualquier proceso matemático con algún dispositivo que permitiera hacer y no calcular.

La técnica de restitución y los restituidores analógicos crecieron rápidamente en importancia, y en la década de 1930 la fotogrametría se había convertido en el método de cartografía preferido en la mayoría de las naciones occidentales (Van Damme, 2015, p. 8). La fotogrametría analógica, basada en aparatos de restitución, será la responsable de la realización de la mayoría de la cartografía mundial.

La mayoría de la cartografía mundial se llevaría a cabo mediante la toma de fotos aéreas, esta consistía esencialmente en tomar fotos desde un avión, lo más perpendicular posible al suelo (es decir, con la cámara montada verticalmente, mirando hacia abajo), con un 60% de superposición entre las imágenes tomadas. Para obtener una cobertura completa de un área, se tomó una secuencia de fotografías en un patrón denominado "cortadora de césped" (Van Damme 2015, p. 8). Posteriormente estas fotos se introducían en un aparato analógico restituidor de tipo óptico o mecánico. Se analizaban fotografías hechas de forma consecutiva, que contenían ciertos objetos en común. De este modo lo que se buscaba era medir el paralaje entre ambas fotografías y de este modo orientar las fotos para crear el modelo estereoscópico, debidamente escalado y nivelado (Linder, 2009; Konecny, 2010).

A pesar de los avances, la fotogrametría analógica era muy costosa y requería de personal especializado, esto limitaba el acceso de ciertas disciplinas a su uso, como en el caso de la arqueología. No obstante, esta dinámica irá cambiando tras la aparición de la fotogrametría analítica y la posterior fotogrametría digital.

3.2.1.3. Fotogrametría analítica

El paso de la fotogrametría analógica a la analítica no fue algo rápido, de hecho, coexistieron ambas técnicas durante largo tiempo. La fotogrametría analógica se centró sobre todo en la producción de dispositivos mecánicos capaces de crear planos fotogramétricos a partir de fotografías. Por otro lado, la fotogrametría analítica se ocupaba principalmente en describir los principios matemáticos que existían detrás de la fotogrametría, se hizo un uso extensivo de las herramientas de álgebra matricial y ajuste de mínimos cuadrados (Van Damme, 2015, p. 9; Konecny, 2014, pp. 123, 127).

Lo que se buscaba principalmente con la fotogrametría analítica, era evitar los tediosos cálculos y agilizar los procesos fotogramétricos. Por lo tanto, lo que se buscaba era el desarrollo de dispositivos que pudieran llevar a cabo secuencias de cálculos complejos (Van Damme, 2015). Durante los años cuarenta se desarrollarían las primeras computadoras, en 1941 Honrad Zuse inventó la primera computadora a la que bautizó como Z1, era el primer sistema informático totalmente programable. Tras este surgirán otros ordenadores como el estadounidense Harvard Mark I, diseñado por Howard H. Aiken y su equipo, este sería el primer ordenador electromecánico construido por IBM.

El advenimiento de la computación y la informática significó un paso crucial para la fotogrametría analítica. El pensamiento analógico-mecánico pretendía con estos nuevos dispositivos eliminar cualquier cálculo por pequeño que fuese. En esta época aparecerán numerosas soluciones analíticas a la resección, orientación, intersección, rectificación y aerotriangulación (Pozuelo, 2004, p. 12).

Con el desarrollo de la computación alrededor de los años 60 los ordenadores se volverían cada vez más accesibles y la fotogrametría analítica alcanzaría fuerza, esto vendría dado por la invención del restituidor analítico por parte del ingeniero finlandés Uki Helava. La diferencia entre ambos radica en que en el restituidor analógico los procesos de orientación se realizan mediante métodos ópticos y mecánicos, y en el caso de los restituidores analíticos estos procesos se hacen mediante un ordenador (Pozuelo, 2004).

El restituidor analítico se convertirá en un instrumento muy importante para la elaboración de mapas durante la década de los 60-70, los trazadores analíticos aun empleaban imágenes analógicas y se operaban como los estereofotógrafos analógicos. En este caso los cálculos matemáticos para alcanzar la relación entre las coordenadas de puntos en las imágenes y las coordenadas de puntos en el elemento/terreno definiéndolas como un sistema de coordenadas tridimensionales, se llevarían a cabo mediante un ordenador (Pozuelo, 2004; Konecny, 2014). Por lo tanto, la principal y más destacada diferencia con los anteriores restituidores es que los puntos no eran transferidos de forma mecánica si no que se hacían mediante la superposición de

estéreo imágenes que se procesaban con ordenador para calcular las coordenadas del mapa.

El restituidor analítico presenta una serie de ventajas: tiene una elevada precisión; se pueden almacenar datos, recuperarlos posteriormente, revisarlos y corregir errores; pueden emplearse fotografías verticales, horizontales, inclinadas, oblicuas y panorámicas; no presentan restricciones en la distancia focal; su uso es más sencillo y fácil, y cuenta con software fotogramétrico automatizado que ayuda a acelerar las tareas.

Las fórmulas que se desarrollarán en la fotogrametría analítica serán también el primer paso para el desarrollo de ortofotos. Este tipo de fotografías son imágenes sin distorsión geométrica, sin errores ni deformaciones, su escala es uniforme en toda la imagen (Van Damme, 2015; Konecny, 2010, p. 126). Este tipo de fotos se pueden emplear para hacer mediciones de distancias verdaderas, esto significó un desarrollo significativo para la disciplina fotogramétrica. Las ortofotografías contienen no sólo el tamaño geométrico, la forma y la posición de los objetos, sino también su color, tono y textura (Van Damme 2015, p. 10). La introducción de los nuevos aparatos tecnológicos como las pantallas de ordenador, permitieron representar gráficamente las coordenadas fotogramétricas de las imágenes y dio pie al desarrollo de las tecnologías y la integración de SIG (Konecny, 2010, p. 127).

La fotogrametría analítica significó una nueva era, las coordenadas de un mapa ya no se definían mecánicamente sino matemáticamente y los cálculos empezaban a ser desarrollados por ordenador. Esta nueva y más rigurosa fotogrametría fue capaz de procesar conjuntos de imágenes cada vez más complejos, trabajar con volúmenes de datos más amplios y permitió una automatización del sistema (Van Damme, 2015). El paso decisivo de la disciplina.

3.2.1.4. Fotogrametría digital

La fotogrametría digital es la última de las cuatro fases de desarrollo. En este punto nos hallamos ante una clara evolución tecnológica. Desde los años ochenta se produjo un gran desarrollo en el campo de la informática, la imagen analógica ha pasado a convertirse en imagen digital, esto permite tratarla de igual forma a como se hace en un proceso analítico tradicional. Este desarrollo hizo posible un gran almacenamiento de datos, redujo los costes y el tiempo de procesamiento.

John Sharp de IBM en 1965 daría los primeros pasos para experimentar en fotogrametría digital, se requirió el desarrollo de ordenadores más potentes para poder

realizar trabajos. En 1972 se produjeron las primeras imágenes por ordenador de la tierra del satélite 11 Landsat-1, lo cual fue un hito histórico.

Los procedimientos digitales serían de uso corriente en la teledetección durante los años 70. En los años 80 el procesamiento de imágenes por ordenador era algo más común, el primero en desarrollar una restituidora digital en esta época fue Helava. Este resolvía con la informática el problema de la epipolarización para la visión estereoscópica y la opción de adicionar posibilidades como la correlación, rectificación y la ortofotografía digital, tratamiento de imágenes digital y técnicas de teledetección (Pozuelo, 2004, p. 13).

En 1988 se presentarían las primeras estaciones de trabajo fotogramétricas digitales, fueron mostradas en el Congreso de Kioto de ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) (Konecny, 2014, pp. 126-127). Las estaciones de trabajo digitales permitieron el uso de la nueva tecnología automatizada, como la triangulación aérea automática, el levantamiento de modelos digitales mediante técnicas de adaptación de imágenes, técnicas de visualización y análisis e integración de sistemas GIS (Konecny, 2014, pp. 126-127).

A finales de la década de los 90 y comienzo de los años 2000 ya se tenía asumido este procesamiento de imágenes digitales. Ha sido en esta última década cuando ha habido una mejora notable de la fotogrametría digital y su aplicación a diferentes campos científicos debido al abaratamiento de los procesos digitales. En los inicios, la fotogrametría era una disciplina poco accesible, tanto a nivel de infraestructuras en trabajo de campo como a nivel tecnológico, es decir, los dispositivos electrónicos, software y hardware a los que se tenía acceso eran insuficientes o prohibitivos debido a su elevado coste. La aparición de equipos informáticos más potentes, de cámaras digitales y su posterior abaratamiento ha permitido que la fotogrametría sea mucho más accesible para cualquiera con interés en el área (Burtch, 2008, pp. 32-34; Konecny, 2014, p. 127).

La fotogrametría digital a día de hoy sigue basándose en las mismas fórmulas matemáticas que la fotogrametría analítica, no obstante, estas fórmulas son realizadas por ordenador. Existen gran cantidad de software especializados que se dedican a facilitar la experiencia del usuario y pueden emplearse sin una formación previa, están preparados para generar cálculos de forma autónoma con solo introducir las fotografías que el usuario considere oportunas.

Actualmente la difusión y los conocimientos informáticos entre gran parte de la población son más elevados que décadas anteriores. Los programas sofisticados de tratamiento de imágenes y CAD no son tan desconocidos como hace veinte años y se emplean en muchísimas disciplinas de forma regular. En la última década se ha desarrollado un notable abanico de programas de uso específico en fotogrametría, tanto

de pago como de código abierto. Este tipo de programas fotogramétricos son cada vez más intuitivos y fáciles de usar para el usuario (*User friendly*). Un ejemplo de algunos de estos programas son *Agisoft PhotoScan*, *Photomodeler*, *123D Catch*, *Hypr3D*, *Pix4D*, etc. Para manejar este tipo de software no es necesario un aprendizaje altamente especializado, únicamente es necesario tener una formación básica sobre la técnica y el aprendizaje específico del programa.

La fotogrametría digital es una técnica aún incipiente, de la cual quedan puntos por depurar. Pero a día de hoy los avances que se han hecho han conseguido que esta disciplina pueda aplicarse a campos de investigación en los que antes no había tenido repercusión. Este es el caso de la arqueología y el uso de la fotogrametría digital como método de documentación. Durante los años 70 se realizaron las primeras pruebas de fotogrametría en arqueología, pero no ha sido hasta la última década que la aplicación de la misma ha sido efectiva con la aparición de la fotogrametría digital.

3.3. HISTORIOGRAFÍA: FOTOGRAMETRÍA EN ARQUEOLOGÍA

El aumento exponencial en la aplicación de técnicas fotogramétricas en el campo arqueológico en las últimas décadas se debe principalmente a la evolución de la fotografía digital. La aparición de nuevos programas informáticos que emplean los principios fotogramétricos, los dotan de una facilidad de uso de la que carecían antaño (Van Damme, 2015; Linder, 2016). Este nuevo software mucho más rápido e intuitivo facilita en gran medida la experiencia al usuario, haciendo a la vez posible una mayor difusión de este tipo de recursos digitales.

La disciplina fotogramétrica es relativamente novedosa en el marco arqueológico llevando menos de una década de uso dentro de territorio español, y ha supuesto para la disciplina una innovación necesaria del registro arqueológico subacuático, convirtiéndose en una herramienta de documentación muy potente. El aumento de estudios en estos últimos años enmarcados en el ámbito de la fotogrametría arqueológica ha generado una gran cantidad de información plasmada en artículos, libros e incluso congresos dedicados algunos de ellos exclusivamente a esta nueva disciplina (*e.g.* Agraftotis y Georgopoulos, 2015; Balletti *et al.*, 2015, 2016). Aun así, la mayoría de estos se enfocan en la arqueología terrestre (Almagro, 2003; De Reu *et al.*, 2014; Charquero, 2016) pero en esta última década la aplicación en el ámbito subacuático ha empezado a mostrar resultados cada vez más interesantes (*e.g.* De Juan *et al.*, 2011, 2013; Drap *et al.*, 2013, 2012, 2015; Miñano *et al.*, 2012).

Este hecho junto con el gran atractivo que suscita como nueva herramienta de documentación ha llevado a la aparición de gran cantidad de cursos de fotogrametría

enfocados a la disciplina arqueológica. En las siguientes paginas haremos un breve recorrido en los primeros pasos de la fotogrametría, tanto en tierra como en el medio acuático, a nivel internacional y nacional.

3.3.1. Primeras investigaciones fotogramétricas aplicadas a la arqueología

La documentación detallada en la labor arqueológica es la piedra angular de nuestra profesión, que en sí misma es destructiva. Las técnicas fotogramétricas en el entorno de la arqueología terrestre desde la última década están brindando a los investigadores la posibilidad de crear registros detallados y con una resolución alta o más que aceptable. Esto ha significado una maximización de las oportunidades de reproducción de conjuntos arqueológicos estructurales o materiales, y la preservación a largo plazo de una documentación más completa y con un nivel de detalle que no era posible con el dibujo tradicional o la fotografía.

La evolución documental desde el dibujo arqueológico, el cual nos brinda una representación bidimensional de la realidad, a una visión 3D en que podemos observar claramente color, anchura, altura y profundidad del objeto o estructura documentada, ha significado un paso realmente importante en cuanto a la percepción y las posibilidades que nos puede ofrecer el empleo de este tipo de técnicas fotogramétricas dentro del registro arqueológico. Es obligación de los investigadores generar una documentación de calidad, ya que la mejora en la calidad documental del patrimonio arqueológico puede ofrecer una ventaja a nivel investigador en un futuro. De igual modo hay que tener en cuenta que este tipo de disciplinas tan visuales pueden ayudar a la difusión de ese patrimonio de una forma novedosa y más efectiva, y servir como base para la restitución por 3D de ciertos yacimientos o piezas, devolviéndoles su brillo pasado y con ello posibilitando a la población una mirada hacia el pasado más clarificadora y amena.

3.3.2. Fotogrametría terrestre

La disciplina fotogramétrica ha tenido un largo recorrido, aproximadamente de cincuenta años desde que se iniciaron los primeros estudios serios de esta disciplina en el plano arqueológico. Significó un paso más allá en el método de documentación, ya que esto dota de una herramienta muy poderosa a los investigadores posibilitándoles la creación de modelos 3D. Si pensamos en las posibilidades que ofrece esta técnica a nivel investigador, el panorama que se nos plantea es realmente interesante, pudiendo compartir información relevante de un yacimiento o una pieza arqueológica mediante

el uso de ortofotos o el levantando de modelos 3D de una forma rápida, sencilla y mostrando la pieza en detalle.

Las primeras investigaciones centradas en la fotogrametría aplicada en arqueología terrestre se iniciaron entre los años 70-90 (*e.g.* Adams, 1974; Fussell, 1982; Anderson, 1982; Miyatsuka, 1996), no obstante, ha sido en la última década cuando se han hecho estudios realmente importantes enfocados en el uso de esta disciplina. Estos estudios no se han enfocado únicamente en documentar yacimientos, sino que también se han aplicado técnicas fotogramétricas en los materiales hallados durante el trabajo de campo, por ejemplo, recreando modelos 3D de piezas cerámicas o líticas (Kalantari y Kasser, 2007; Lin *et al.*, 2010; Koutsoudis y Chamzas, 2011; Clarkson y Hiscock, 2011; Barreau *et al.*, 2014).

Un claro ejemplo en aplicaciones documentales de documentación a nivel de entorno arqueológico lo hallaríamos en los trabajos de Lerma *et al.* (2010) y Sanz *et al.* (2010), en ambas investigaciones se empleó el uso de técnicas fotogramétricas para generar un registro de arte rupestre procedente de la Península Ibérica. También se empleó el mismo tipo de registro en trabajos desarrollados en Gran Bretaña (Chandler *et al.*, 2007; Simpson *et al.*, 2004), la fotogrametría a resultado una herramienta enormemente útil en el registro de yacimientos prehistóricos (Núñez, 2013; Discamps *et al.*, 2016; Robert *et al.*, 2016).

Otro de los ámbitos prometedores en esta área es el registro de restos óseos, es decir, la aplicación de estos métodos de documentación en los enterramientos o estructuras funerarias halladas en yacimiento. Este tipo de documentación a nivel antropológico es realmente interesante, permitiendo un registro más detallado para el antropólogo y quizá pudiendo ser relevante durante el proceso posterior de análisis de los restos biológicos y su ubicación (Charquero, 2016). Existen incluso algunas investigaciones muy tempranas que emplearon la fotogrametría para el estudio de la morfología dental y facial de los restos óseos, como es el caso de Savara (1965), de igual modo se ha empleado esta técnica para la reconstrucción craneal y de restitución ósea (Malacuso, 2010; Katz *et al.*, 2014).

En la última década algunas investigaciones han demostrado la utilidad de esta disciplina no sólo a nivel arqueológico si no también patrimonial, empleando la fotogrametría como base para poder documentar y analizar diversas piezas o entornos patrimoniales (Pavlidis *et al.*, 2007; Guidi *et al.*, 2004; Hendrickx *et al.*, 2011; Koutsoudis *et al.*, 2007). También se ha empleado el uso de las técnicas fotogramétricas para la reconstrucción de ciertos objetos patrimoniales, como esculturas, cerámica, yacimientos en mal estado de conservación, etc. (Chow y Chan, 2009; Bruno *et al.*, 2010; Fatuzzo *et al.*, 2011; Rua y Alvito, 2011).

Por otro lado, el sistema y toma de fotos en tierra es mucho más simple y asequible que en el medio acuático, simplemente necesitamos una cámara digital, un software de restitución y un ordenador (Charquero, 2016, p. 142). En caso de que se necesite elevar la cámara se puede recurrir a una pértiga telescópica al final de la cual se sitúa la cámara de fotos, esta debe estar conectada a una pantalla LCD, *tablet* o *smartphone* que nos muestre lo que estamos enfocando (Charquero, 2016, p. 142). Al igual que en los procesos subacuáticos la cámara deberá calibrarse, y tomar una medida de referencia que nos ayude a escalar.

3.3.3. Fotogrametría subacuática

El desarrollo de la fotogrametría subacuática supuso un gran avance, la aplicación de un método rápido y confiable para la documentación en entornos acuáticos es algo relevante, debido a la dificultad añadida de trabajar en un entorno hiperbárico, dificultad que no contemplamos en el trabajo de campo en tierra (Bass, 2011, 2013). El arqueólogo subacuático se ve supeditado a las condiciones ambientales del medio en el que trabaja, en muchas ocasiones el tiempo de inmersión se ve limitado según la profundidad a la que se descienda, y de igual modo dependemos de factores como la visibilidad o las corrientes subacuáticas (Bass, 2011; Bryson, 2012; Miñano *et al.*, 2012).

El acceso a la fotogrametría en el plano arqueológico se ha visto influido por el avance de diversas disciplinas, como por ejemplo el desarrollo de cámaras digitales con posibilidad de convertirlas en estancas, pero el elemento más importante fueron los numerosos avances en el área de la exploración submarina y los equipos empleados (Nieto, 1984; Bohrer, 2011; Bass, 2011). El principal invento que significó toda una revolución fue en los años cuarenta el regulador de Cousteau-Gagnan (Nieto, 1984; Bass, 2011; Drap, 2012), el cual posibilitó el desarrollo de la arqueología subacuática y las primeras técnicas de excavación submarina. Este invento mejoró de forma notable la movilidad de los buzos, permitiendo trabajar de forma más precisa sobre el terreno arqueológico.

En 1950 se llevaron a cabo en el Mediterráneo los primeros intentos de excavar diversos pecios romanos, Grand Congloué, Cape Dramont, y Île du Levant en Francia, Mahdia en Túnez, y Albenga en Italia (Bass, 2011, p. 4). Estas investigaciones pioneras probaron diferentes métodos, e involucraron el uso de cámaras de 35 mm, estas estaban selladas con una carcasa estanca. Las cámaras eran colocadas en barras metálicas que conformaban todas juntas una cuadrícula, este invento desarrollado por Giani Rogh permitía crear un método de mapeo que consistía en tomar fotografías superpuestas, es decir, utilizando la técnica denominada estereofotogrametría. (Bass,

2011, p.4; Roghi 1958-1959, 1959, 1965). Aun así, en estas excavaciones los arqueólogos no ejercieron como buzos, si no que contrataron buzos profesionales los cuales les entregaban los artefactos hallados, con lo que no fue una excavación al uso realmente (Bass, 2011, p. 4).

Estos primeros intentos en el campo de la fotogrametría subacuática significaron un punto de inflexión, en las décadas posteriores la técnica creció de forma cada vez más notoria (*e.g.* Bass 1966; Bass *et al.*, 1967; Ciani *et al.*, 1971; Hoehle, 1971; Pollio, 1971; Rosencrantz, 1975; Baker y Green, 1976). No obstante, en estas primeras décadas la fotogrametría era aún un campo muy especializado y de difícil acceso, los equipos no contaban con suficiente potencia y las cámaras no habían alcanzado aún la era digital, eran aparatos caros y difícilmente se podían conseguir a bajo coste. De igual modo, para poder llevar a cabo estudios fotogramétricos era necesario tener a especialistas trabajando junto con arqueólogos, ya que en ese momento era una técnica especializada y no existían los softwares automatizados (Van Damme, 2015).

Las primeras investigaciones subacuáticas más relevantes fueron las llevadas a cabo por el conocido arqueólogo George Bass y su equipo en el Mediterráneo oriental (*e.g.* Bass, 1966, 1972; Bass y Rosencrantz, 1973; Rosencrantz, 1975), estas primeras intervenciones subacuáticas se convertirían en un precedente, ya que durante la realización de las mismas se aplicaron técnicas procedentes de otras disciplinas a las propias de la excavación subacuática, como serían la fotografía, el video, la teledetección y la fotogrametría. El valor potencial de este tipo de técnicas en el medio subacuático sería reconocida de forma temprana por la comunidad científica (Bass 1966, pp. 112-118). La aplicación de la fotogrametría en estos primeros estadios de evolución minimizó el tiempo de documentación bajo el agua, por otro lado, requería un tiempo superior al actual en el procesamiento de imágenes tras la documentación se necesitaba en ocasiones más de 56 horas de trabajo manual (McCarthy, 2014).

Actualmente este tipo de inconvenientes post-documentación ya no son tan acusados, la aparición de equipos informáticos más potentes ha reducido significativamente el tiempo invertido en el procesamiento de imágenes, y los softwares de automatización fotogramétrica han significado toda una revolución a nivel técnico para la documentación subacuática. Esto ha llevado a causar un interés creciente dentro del mundo académico e investigador hacia este tipo de técnicas, que son rápidas y a día de hoy también son más asequibles que hace cuarenta años (McCarthy, 2014; Van Damme, 2015; Linder 2016; Canciani, 2002).

3.3.4. Investigaciones en fotogrametría subacuática hasta la fecha

En las últimas décadas se han llevado a cabo numerosas investigaciones en las que se ha empleado la fotogrametría o se han hecho estudios sobre la misma aplicada como método de documentación. Algunas de estas investigaciones son las de: Zhukovsky *et al.* (2013), Van Damme (2015), Bandiera *et al.* (2015), Hulot *et al.* (2015), Yamafune *et al.* (2016) y Demesticha *et al.* (2014). A nivel nacional actualmente también contamos con ciertas investigaciones subacuáticas en territorio español donde se ha aplicado la fotogrametría como método de documentación, como el caso de los pecios Mazarrón I y II, llevados a cabo por Museo Nacional de Arqueología Subacuática (ARQVA) (Miñano *et al.*, 2012); el pecio del Bou Ferrer en Villajoyosa, Alicante (Mayans, 2015; Moyano 2017) así como la investigación en desarrollo actualmente mediante fotogrametría de los pecios de Cala Cativa I y Deltebre I, ambos excavados por el *Centre d'Arqueologia de Catalunya* (CASC).

Si bien es cierto que se han llevado a cabo numerosas reconstrucciones por medio de la fotogrametría, la gran mayoría de estas recreaciones se han empleado para ilustrar artículos de carácter divulgativo o para difusión en los medios. El objetivo principal es producir animaciones, dibujos y proyecciones ortogonales para divulgar y explicar los proyectos en tiempo real a medida que van desarrollándose (Yamafune *et al.*, 2016). Aún existe un gran vacío en publicaciones de carácter investigador focalizadas hacia un ámbito más técnico y analítico a nivel arquitectónico. Algunos ejemplos encarados a difusión arqueológica e histórica, los encontramos en publicaciones de divulgación como en el caso del pecio Bou Ferrer (Mayans, 2015) del cual se publicó una ortofoto realizada por el Taller de Imagen de la Universidad de Alicante (UA), junto al equipo de Patrimonio Virtual de la UA. Hallamos otros casos, como el de los modelos fotogramétricos creados a partir de los más de cuarenta barcos naufragados en el mar Negro frente a la costa norte de Turquía (Forssmann, 2016).

Las ventajas que supone la aplicación de este tipo de recreaciones 3D en arquitectura naval son patentes, tanto a nivel documental, como en el análisis arquitectónico de pecios (análisis de cascos, sus líneas de agua, secciones, tipología, etc.). Pese a esto, nos hallamos ante un evidente escollo a nivel investigador debido a la casi inexistencia de estudios en esta línea. El investigador George Bass, en la introducción de la obra *The Development of Maritime Archaeology* (2012), hace notar esta problemática sobre la falta de publicaciones, en general, en el ámbito de la arqueología subacuática. Lo plantea como un verdadero problema debido a que se pierde parte del flujo de información, ya que no se llega a publicar ni un 25% del material y resultados que se obtienen en las excavaciones arqueológicas profesionales. Es posible, que debido a este tipo de tendencia a nivel investigador sea tan complicado poder hallar investigaciones actuales sobre el tema que nos concierne.

Es paradójico que tal dinámica tenga lugar en la calificada como 'Era de la información'. Hoy día contamos con conexión permanente en casi cualquier parte del mundo y disponemos de internet en casi cualquier emplazamiento, ya sea mediante conexión por cable, a través de redes Wifi o transmisión de datos móviles. Con lo cual existe un gran potencial para intercambiar información, debatir temas relevantes, y romper con problemas logísticos propios del pasado. A pesar de ello, aún hoy en día es complicado acceder a cierta información o publicaciones. El objetivo principal de este tipo de publicaciones de carácter académico e investigador es compartir con la comunidad académica la información obtenida mediante el trabajo de campo. Si se produce una 'evasión' u olvido de este importante paso en el proceso de investigación nos hallamos ante un importante obstáculo, no sólo para el futuro de la disciplina sino también para el avance y el conocimiento global de esta.

IV. CASOS DE ESTUDIO

Nuestros casos de estudio son los pecios Cala cativa I y Deltebre I. Ambos pecios son muy dispares cronológicamente, el primero data entre el siglo I a.C. – II d.C., y el segundo data aproximadamente entre finales XVIII y principios del XIX.

Uno de los principales objetivos de la documentación por fotogrametría en pecios es poder reconstruir las formas y estructuras de los navíos hallados. Interpretar este tipo de hallazgos puede significar un trabajo arduo, en ocasiones debido a las condiciones del medio o al estado de conservación de los restos y del porcentaje del casco conservado. Los restos de embarcaciones suelen presentarse como superficies relativamente complejas, la reconstrucción de las mismas mediante la aplicación de técnicas fotogramétricas puede ayudar a comprender y analizar estas estructuras navales, arrojando datos relevantes tanto a nivel histórico, como tecnológico y cultural.

Algunos de los estudios más antiguos dedicados a la fotogrametría en pecios se remontan a los años setenta, ejemplos de estos son las primeras pruebas fotogramétricas del George Bass (1970), la investigación de la *Naval Oceanographic Office* dirigida por Joseph Pollio (1968), y cerca de los años ochenta los estudios de Faig (1979) y Bass y Rosencrantz (1973).

En esta última década se han llevado a cabo algunas investigaciones sobre pecios en las que se ha empleado la fotogrametría como método de documentación, algunas de estas investigaciones son las de Miñano *et al.* (2012), Zhukovsky *et al.* (2013), Bandiera *et al.* (2015) y Hulot *et al.* (2015). Algunos trabajos destacables de estas últimas investigaciones son los de Yamafune *et al.* (2016), el cual en su artículo analiza un pecio del siglo XIX del sur de Brasil (*Lagoa do Peixe*) y de un naufragio del siglo XVI en Croacia (naufragio de Gnalić). En ambos casos se generó una reconstrucción 3D de ambas embarcaciones, tanto para su documentación, como para su posterior estudio arquitectónico.

A nivel nacional actualmente también contamos con ciertas investigaciones sobre pecios en territorio español, como el caso de los Mazarrón I y II, llevados a cabo por Museo Nacional de Arqueología Subacuática (ARQVA) (Miñano *et al.*, 2012); y el del pecio del Bou Ferrer en Villajoyosa, Alicante (Mayans, 2015; De Juan Fuertes *et al.*, 2013).

Si bien es cierto que se han llevado a cabo numerosas reconstrucciones 3D mediante este sistema, la gran mayoría de estas recreaciones se han empleado para ilustrar artículos de carácter divulgativo o para difusión en los medios. El objetivo principal es producir animaciones, dibujos y proyecciones ortogonales para divulgar y

explicar los proyectos en tiempo real a medida que van desarrollándose (Yamafune *et al.*, 2016).

4.2. CALA CATIVA I

4.2.1. Introducción del yacimiento

El yacimiento de Cala Cativa I se encuentra en el municipio catalán de El Port de la Selva (Girona), a unos 400 metros aproximadamente de la costa entre la Punta de Cala Cativa al este y el Cap Mitjà al sur³. El pecio reposa en un lecho de arena a unos 33 metros de profundidad.

La primera noticia escrita de la que se tiene constancia sobre la existencia del pecio de Cala Cativa se remonta al año 1894. El arqueólogo Romualdo Alfarás, corresponsal de la Asociación Artístico-arqueológica Barcelonesa, dejó constancia de ello en su artículo "Pesca de ánforas" publicado en el boletín número 40 de dicha asociación. En este artículo Alfarás relata con detalle como unos buzos dedicados a la pesca del coral en la zona del Cap de Creus, extrajeron restos de ánforas que podrían pertenecer a una embarcación griega o romana⁴ (Alfaras, 1894; Raurich, 1994).

Tras la expectación que despertó el hallazgo, Alfarás planificó una intervención en la zona donde fueron halladas las ánforas. Esta primera intervención se ha considerado como una de las primeras y más antiguas excavaciones arqueológicas en el ámbito subacuático en territorio español (Alfarás, 1894; Raurich, 1994). El 21 de agosto de 1894 Alfarás reclutó a los buzos que hallaron las ánforas, y el día 22 de agosto de 1984, guiados por un buceador veterano, se dirigieron en tres embarcaciones hacia el lugar en cuestión. Una vez fondeados en el lugar indicado, se ratificó la existencia de las ánforas y se procedió a su extracción. En dos días de trabajo se extrajeron unas 62 ánforas, 13 de las cuales estaban en perfectas condiciones, 30 con alguna que otra fractura y el resto mucho más fracturadas (Alfarás, 1894). Además de las ánforas se extrajo un cepo de plomo y fragmentos de un ancla de hierro (Alfarás, 1894; Vivar y Geli, 2015a).

Es interesante ver como en *Pesca de ánforas* Alfarás demuestra un interés más que material hacia los objetos hallados, se puede observar el interés histórico del autor hacia los restos materiales, se implica en la elaboración de una descripción

³ Para proteger el yacimiento de posibles espolios o daños en él, no se facilitan sus coordenadas.

⁴ Se ha de tener en cuenta, que en aquella época aún no existía ninguna tabla tipológica para clasificar las ánforas. Alfarás sabía que eran ánforas, pero estas, podían ser o griegas o romanas.

pormenorizada de las tareas que se realizaron en la intervención, así como una descripción, con el conocimiento del que disponían en el siglo XIX sobre las ánforas (Alfarás, 1894, pp. 91-92). Describe tanto el color, su forma, y el revestimiento interno de resina, que él interpreta como betún e incluso examinó si las ánforas presentaban marcas de fábrica, lo cual sólo pudo observarlo en dos de los ejemplares recuperados, interpretando la inscripción como “una cruz de cuatro brazos iguales” (Alfarás, 1894, p. 93).

Con estas descripciones resulta complicado saber de qué tipo de ánforas se trataba, ya que son descripciones muy generales sin ningún dato concreto, y tampoco se realizó ningún dibujo del material extraído o cualquier tipo de documentación escrita. Por suerte, hoy en día se sabe gracias a que una veintena de esas ánforas fueron a parar al *Museu d'Arqueologia de Catalunya* en Barcelona, que se trataba de ánforas vinarias del tipo Pascual 1. A esto se le ha de añadir la extracción en 1964 de dos ánforas más que se depositaron en el *Museu Arqueològic Provincial de Girona* (Raurich, 1994) y los restos de fragmentos que se recuperaron de las intervenciones realizadas por el CASC en 2015 y 2016.

Se tiene constancia por algunas fuentes que en 1895 se extrajeron más restos arqueológicos, pero no se menciona si fueron realizadas por Alfarás (Raurich, 1994). Tanto las ánforas extraídas en 1894 como el material de 1895 fueron subastados públicamente ya que provenían de un naufragio (Raurich, 1994). Después de la actuación de Alfarás y la posterior extracción de material el 1895, no se volverá a tener noticias del yacimiento de Cala Cativa, aun así, la intervención de Alfarás no pasará desapercibida en el ámbito arqueológico ya que será citado en varios trabajos de arqueología subacuática posteriores a mediados de los años cincuenta (Raurich, 1994). En esas fechas, en concreto 1956, debido a las pocas indicaciones que hace Alfarás en su texto sobre la localización del yacimiento, hacen que el arqueólogo Miquel Oliva, por aquel entonces director del *Museu Arqueològic Provincial de Girona* con la colaboración de los buzos del CRIS de Barcelona (*Centre de Recuperació i d'Investigacions Subaquàtiques*) intentaron sin éxito localizar de nuevo el yacimiento.

El redescubrimiento del pecio no se produciría hasta 1964, por Federico Foester, en que les notificaba a Miquel Oliva el estado del yacimiento (Raurich, 1994), el cual a simple vista puede observar fragmentos de unas 20 ánforas y algunos restos de madera, pero que se precisaría de una intervención mucho más concienzuda para poder sondear el yacimiento y así determinar si bajo los sedimentos había más restos de material y madera del barco. Esta intervención no se llegó a realizar nunca.

Lamentablemente, por aquellas fechas, el yacimiento de Cala Cativa, como la gran mayoría de pecios del litoral catalán fueron el objetivo del expolio con fines

obviamente comerciales. En este caso fue producido por buceadores belgas con base en la localidad francesa de Port-Vendres. Así, en este estado de completo expolio es como, en 1992, se lo encontraron los arqueólogos del CASC cuando fueron para localizarlo y posicionarlo con coordenadas geográficas para introducirlo en la carta arqueológica del litoral catalán que estaban realizando.

Ya no será hasta 2015, después de la excavación del pecio de Cap de Vol en 2012 (Vivar y Geli, 2014a) y enmarcado en el mismo proyecto de investigación *Estudi del comerç, l'exportació i les xarxes de redistribució del vi entre els segles I aC. i II dC. al Conventus Tarraconensis*⁵ (2014-2017), que se decidió volver a localizar el yacimiento para ver si conservaba restos de madera y arquitectura naval para ver si eran similares a los de Cap de Vol ya que ambos transportaban ánforas vinarias Pascual 1 (Vivar y Geli, 2014a).

4.2.2. Campañas realizadas

Como se ha dicho anteriormente, la excavación del yacimiento de Cala Cativa está enmarcada en el proyecto del estudio del comercio del vino en el *Conventus Tarraconensis*. El objetivo principal de esta intervención era intentar estudiar la arquitectura naval del barco, en caso de que la hubiera, para comprobar si compartía las mismas características constructivas que el pecio de Cap de Vol (Vivar y Geli, 2014a). La elección del yacimiento fue debido a su cargamento, desgraciadamente expoliado, pero que gracias a la documentación que existía, dejaba constancia de que en el *Museu d'Arqueologia de Catalunya* había un lote de 20 ánforas Pascual 1 procedentes de Cala Cativa, el mismo que Cap de Vol.

Para la realización de los trabajos, el CASC empleó su plataforma de trabajo, la embarcación *Thetis*. Como la profundidad del pecio, según las fuentes se encontraba a unos 33 metros de profundidad se tuvo que realizar una planificación de las inmersiones muy detallada para poder aprovechar el máximo tiempo de fondo, para poder realizar dos inmersiones al día. El plan de acción era el siguiente (Vivar y Geli, 2015a):

- Se organizaron a los arqueólogos en tres grupos de tres o cuatro personas.
- Cada grupo realizaba un turno por la mañana y uno por la tarde.
- Las tareas de cada turno eran similares a diferencia del primer y tercer turno. El primero era el encargado de montar las mangas de succión y enviar la señal para su activación mediante el lanzamiento de una 'boya deco' a superficie. Y el

⁵ Traducción: *Estudio del comercio, la exportación i las redes de redistribución del vino entre los siglos I a.C. y II d.C. en el Conventus Tarraconensis*

tercer turno que se encargaba de recoger el material al finalizar la jornada por la tarde.

- El tiempo de fondo en la primera inmersión era de 35 minutos o menos (dependiendo del consumo de aire). El límite de Bares de presión, por seguridad se estableció en 60, en vez de los 50 estipulados en el buceo recreativo.
- Cómo en todas las inmersiones se entraba en descompresión, el ascenso en la primera inmersión se realizaba a una velocidad no superior a los 9 m/s, realizando una parada profunda de 2 minutos a 16 metros. Con la misma velocidad de ascenso se llegaba a los 6 metros, donde se cambia el consumo de aire de la botella por oxígeno puro (al 100%), que era suministrado por 4 narguilés que colgaban por la borda. Este procedimiento era debido a que de esta forma se acortaba el tiempo de descompresión, realizando solamente una parada de 10 minutos a esa profundidad y limpiaba el organismo de nitrógeno residual. Permitiendo así poder alargar la segunda inmersión. Al finalizar la parada a 6 metros, se volvía a pasar al aire de las botellas y se realizaba un ascenso hasta superficie en un tiempo de 3 minutos.
- El tiempo en superficie era de un mínimo de 3 horas y 5 minutos, de esta forma, como se ha comentado en el punto anterior, se podía realizar una segunda inmersión con tiempo de fondo un poco más largo, de 30 minutos. En esta segunda inmersión el procedimiento de ascenso era el siguiente: una parada de 2 minutos a 16 metros, una parada de 3 minutos a 9 metros y a 6 metros volver a realizar el cambio de aire de las botellas a oxígeno puro, esta vez durante 20 minutos.
- Para no tener que tabular más tiempo, es decir estar más tiempo haciendo la descompresión, los trabajos cesaban aproximadamente 2 minutos antes del tiempo estipulado. De esta forma cuando se iniciaba el ascenso se estaba dentro de los tiempos establecidos.
- Tanto en el descenso como el ascenso del barco al yacimiento se hacía por el cabo que se usaba para fondear.
- Los cambios de turno se realizaban en el agua, es decir, cuando pasaban los 35 minutos (por la mañana) o los 30 (por la tarde) el siguiente grupo ya debía estar en el agua empezando el descenso al yacimiento. Ambos grupos se encontraban en el cabo guía.

Lo primero que se hizo al llegar al lugar del que se tenían las coordenadas, fue localizar la madera del barco, ya que no era visible a simple vista, únicamente eran visibles restos de cerámicos de Pascual 1 esparcidos en superficie (Vivar y Geli, 2015a). Para ello se realizaron sondeos con dos mangas de succión de agua. Se descartó el uso de mangas de succión de aire ya que a esa profundidad la succión que ejercen debido a la presión es tan grande que, si bien es cierto que la extracción de sedimento sería mucho más rápida, podría dañar la madera con facilidad o en caso de taponarse,

destrozar los tubos de evacuación de sedimento. Se realizaron tres sondeos ya que al tercero ya apareció madera bajo unos 20 centímetros de sedimento arenoso.

A partir del sondeo positivo, se empezó a abrir en extensión, para dejar al descubierto la madera del barco y poder ver así las dimensiones de la nave naufragada. Al mismo tiempo que se realizaba esta tarea, se iban retirando y calcificando los restos cerámicos de Pascual 1 según si eran fragmentos informes o con forma (asas, bordes o pivotes) (Vivar y Geli, 2015a). También se separaban los elementos de cerámica fina o fragmentos de ánfora diferente al tipo Pascual 1, ya fueran formas o informes ya que muy posiblemente fueran de la tripulación y servirían para poder datar con más exactitud el yacimiento (Vivar y Geli, 2015a).

Una vez destapado todos los restos de madera pertenecientes al casco de la embarcación, se pudo ver que tenía una eslora aproximada de unos siete metros por unos dos metros y medio de manga. Posteriormente se procedió al etiquetaje. Se numeraron las cuadernas (tanto las existentes como las que no estaban pero habían dejado su impronta en las tablas del forro) de la proa⁶ a la popa con una numeración correlativa de la Q100 hasta la Q125⁷ (Vivar y Geli, 2015a). Las tablas del forro se etiquetaron A seguido de una E si se encontraban en el lado de estribor o B si era en el lado de babor seguida de un número que empezaba de la 1 (siendo esta la de aparadura) hasta las que hubiera conservadas. Finalmente, la quilla se etiquetó con una 'K'. Posteriormente, se procedió al marcaje de las cabillas de madera, tanto las que servían para fijar las lengüetas de las tablas del forro, como las que servían para la fijación de las cuadernas. Para ello se usaron chinchetas de cabeza blanca para que se vieran bien a la hora de documentar.

Al finalizar la campaña se procedió a tapar el yacimiento para la siguiente campaña. Para ello se realizó el mismo procedimiento que se hizo en los trabajos de Cap de Vol (Vivar y Geli, 2014a). Primero se retiraron los elementos de marcaje para que no estropearan la madera del barco, se llenaron bolsas de plástico con arena de los alrededores y se colocaron en las claras entre cuadernas para que cuando se pusiera la lona de geotextil, estas no se desplazaran o se chafaran. Luego se cubrió como hemos mencionado con geotextil, que fue fijado con pesos, y finalmente se arrojó arena de los alrededores sobre la lona. Este procedimiento a la hora de cubrir el yacimiento aparte de protegerlo de posibles expolios como de las propias inclemencias del mar, es muy útil, puesto que facilita enormemente las tareas de destape para la siguiente campaña (Vivar y Geli, 2015a).

⁶ La proa se determinó gracias a un encaje practicado en la primera cuaderna conservada que servía para alojar el pie del mástil.

⁷El motivo de esta numeración es que si por el motivo que fuera aparecieran cuadernas por delante que no se hubieran detectado o hubiera estado el casco fragmentado en varias partes.

En el año 2016 se inició otra campaña con el objetivo de continuar con las tareas que se quedaron pendientes en la campaña anterior y realizar comprobaciones en el terreno con la planimetría generada el año anterior. El planteamiento de las inmersiones fue exactamente el mismo que en 2015, ya que los resultados obtenidos fueron muy favorables. Lo primero que se hizo fue destapar el yacimiento, para ello se volvieron a usar las dos mangas de succión de agua para retirar la arena que había sobre la lona. Una vez retirada toda la arena se retiró la lona, luego las bolsas de plástico con arena que había en las claras de las cuadernas y finalmente se volvió a limpiar la madera de sedimento para volver a realizar el etiquetaje y marcaje de los diferentes elementos de la arquitectura naval (Vivar y Geli, 2016a). Para ello se siguieron exactamente las mismas pautas de 2015. Posteriormente se excavó todo el perímetro alrededor del barco para ver si aparecían más elementos de madera de la embarcación o elementos de la tripulación.

Finalizada la campaña, se procedió a tapar el yacimiento. Antes que nada, se volvieron a retirar las etiquetas y elementos de marcaje y se volvieron a colocar las bolsas de plástico entre las claras de las cuadernas para evitar que se chafasen. Luego, en vez de colocar la lona de geotextil se invirtieron las descargas de las mangas de succión y se empezó a aportar arena de los alrededores del yacimiento sobre este hasta quedar cubierto por una capa de medio metro de sedimento.

Como se ha dicho, el pecio de Cala Cativa presenta unas características constructivas que lo situarían en la misma familia constructiva que Cap de Vol pero de dimensiones considerablemente más pequeñas y una cronología anterior (el de Cala Cativa). Con Cala Cativa ya son tres los pecios excavados en Catalunya que tenían un cargamento homogéneo de ánforas Pascual 1: Cala Cativa, Cap de Vol y Aiguablava I. Este último no conservó restos de arquitectura naval, pero sí de gran parte de su cargamento, que gracias a su estudio dio una cronología del último cuarto del siglo I a.C. y permitió realizar un cálculo aproximado de su eslora (Geli, 2012).

Con todos estos datos, más los aportados por otras excavaciones en el litoral francés de pecios con el mismo cargamento y características, tal y como exponen los arqueólogos del CASC, los tres yacimientos estarían relacionados, y formarían parte de una misma familia constructiva, pensada para navegación de cabotaje y que permitiera la entrada y salida de las zonas de marismas muy comunes en todo el litoral francés y catalán.

Respecto a los resultados obtenidos de las intervenciones arqueológicas realizadas por el CASC en el yacimiento durante los años 2015 y 2016, se puede decir que, como ya observó Foester en 1964 y el CASC en 1992 (Raurich, 1994; Vivar y Geli, 2015a, 2016a), el yacimiento había sido objeto de expolio por lo que no quedaba ningún resto de material entero, únicamente fragmentos, por lo que los restos de cargamento fueron muy pobres. Aun así, se han podido documentar restos materiales asociados a la

tripulación tales como fragmentos de ánforas itálicas Dressel 1A, Dressel 2-4 itálica, cerámica fina Campaniense A y B y pre-sigillata. Estos hallazgos han permitido establecer una horquilla cronológica entre los años 30 a.C. y 20 a.C.

4.2.3. Método de documentación

La documentación del yacimiento en 2015 se realizó mediante el dibujo tradicional usando una escala milimétrica nivelada y la plasmación a escala 1:10 dibujada con lápiz y goma en una hoja de papel poliéster.

En 2016, como la planimetría ya estaba realizada del año anterior, se aprovechó para realizar algunas comprobaciones métricas e introducir elementos de fijación que hubieran podido pasar por alto en la campaña anterior. Para ello, con la planimetría vectorizada, se hizo uso tanto del papel poliéster como el uso de *tablets* que mediante carcasas presurizadas se podían bajar hasta el yacimiento y realizar los cambios pertinentes. Se continuó con el dibujo de las secciones que quedaron pendientes de la campaña anterior.

4.3 DELTEBRE I

4.3.1. Introducción del yacimiento

La primera noticia que se tiene del pecio Deltebre I se remontan al 22 de julio de 2008, cuando el Sr. Carles Somolinos, pescador de Amposta, localizó la zona donde se encontraba el barco hundido (Vivar *et al.*, 2014b). El *Centre d'Arqueologia Subaquàtica de Catalunya* (CASC) se encargó de realizar una intervención de urgencia para determinar el tipo de pecio ante el que se hallaban, cuál era su estado de conservación y si había sufrido expolio o algún tipo de degradación por agentes naturales (Vivar y Geli, 2015b).

Se pudo documentar que el yacimiento se encontraba en un estado excepcional de conservación, pero que se hallaba destapado desde hacía poco, y esto se debía al fenómeno de regresión que sufre el Delta del Ebro por la construcción contemporánea de presas, las cuales frenan la aportación de sedimento fluvial en la desembocadura del Delta (Vivar *et al.*, 2014b, p. 280). Esta falta de aportación de sedimento suponía que el pecio acabase degradándose debido a los agentes naturales por lo que el CASC decidió realizar una serie de medidas para proteger el derrelicto. (Vivar *et al.*, 2014b).

Las investigaciones arrojaron datos sobre su cronología, se situaba entre finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX, se constató que en su bodega portaba munición por lo que se llegó a la conclusión de que era un barco de tipo militar (Vivar *et al.*, 2014b, p. 280). La nacionalidad del mismo no se pudo constatar en la primera excavación, pero en campañas sucesivas se halló un cañón de bronce el cual fue extraído. Dicho cañón portaba una inscripción en la cual se podía leer la fecha 1798 y aparecía grabado el escudo del rey Jorge III de Inglaterra (Vivar *et al.*, 2014b, p. 280). Con estos datos y la situación del pecio se cree que el naufragio del mismo se dio en el marco de la Guerra del Francés. Deltebre I sería pues una de las embarcaciones inglesas que quedaron embarrancadas en la desembocadura del Ebro, por lo que era parte de uno de los convoyes que conformaron la expedición marítima de la armada inglesa encabezada por John Murray y el contralmirante Hallowell para liberar la ciudad de Tarragona (Vivar *et al.*, 2014, pp. 284-287).

4.3.2. Campañas realizadas

Las campañas arqueológicas realizadas en Deltebre I se llevaron a cabo por el *Centre d'Arqueologia Subaquàtica de Catalunya* (CASC). Estas se iniciaron en el año 2009, las cuales se enmarcan dentro del *Curs pràctic d'arqueologia subaquàtica* organizado por el CASC. Desde ese momento han realizado campañas ininterrumpidamente hasta el año 2017.

Para la realización de los trabajos en Deltebre I, el CASC empleó también en este caso su plataforma de trabajo, la embarcación Thetis. En este caso la planificación de las inmersiones seguiría la dinámica de trabajo del CASC, en todas las campañas se realizaron 2 inmersiones diarias. Como la profundidad a la que se encontraba el pecio era de 7 metros, el tiempo bajo el agua era de aproximadamente una hora (Vivar y Geli, 2015b, 2016b). El Plan de acción diario era el siguiente (Vivar y Geli, 2015b, 2016b):

- Se organizaron a los arqueólogos en dos grupos de tres o cuatro personas.
- Cada grupo realizaba un turno por la mañana y uno por la tarde.
- Las tareas de cada turno eran similares a excepción del montaje y recogida del material. El primero era el encargado de montar las mangas de succión y hacer la señal de activación, subiendo uno de los buzos a superficie y haciendo la señal. Y el segundo grupo que se encargaba de recoger el material al finalizar la jornada por la tarde.
- El tiempo de fondo en la primera inmersión era de 1 hora y cuarto (dependiendo del consumo de aire).
- Debido a la profundidad del yacimiento, 7 metros, nunca se entraba en descompresión.

- El tiempo en superficie era el necesario para comer los dos grupos.
- En caso de mala visibilidad se amarraba un cabo desde la regala del barco hasta el yacimiento, mediante un plomo o atando el cabo en un perno de bronce de la sobrequilla. Además, se colocaba un cabo de proa a popa del barco para poder orientarse.
- En caso de que se perdiera alguien, solamente tenía que subir a superficie, notificar al personal en superficie que todo estaba correcto y dirigirse al tubo de la manga de succión para descender o desde el cabo amarrado al barco.
- Los cambios de turno se realizaban en el agua, es decir, cuando pasaba la hora y cuarto el siguiente grupo ya debía estar en el agua empezando el descenso al yacimiento para realizar el cambio.

Las primeras intervenciones se llevaron a cabo en la sección de popa, puesto que era el lugar donde se encontraban las estancias de los oficiales y se buscaba saber la nacionalidad del navío, esta necesidad de identificar la nacionalidad del derrelicto se debía a la convención de la UNESCO, ya que por ley se debe comunicar la nacionalidad de los derrelictos hallados (Vivar y Geli, 2016b, p. 3).

En 2009 se abrió una extensión de 48m² empezando desde la popa, se documentó parte de la carga del navío que se encontraba dispersa sobre la superficie del mismo, se trataba de balas de plomo de fusil (Vivar y Geli, 2016b). En 2010 la excavación prosiguió en el punto que se dejó la campaña anterior, se hallaron barriles con balas de plomo en su interior y algunas cajas, se documentó la estibación de la carga y se retiró, en el momento de extraer la carga se pudo apreciar debajo como aparecía la estructura de una tarima de madera donde se apoyaba la carga (Vivar y Geli, 2016b). Durante las excavaciones de 2011 se retiró el sedimento de la zona de tarima donde se habían dejado los trabajos el año anterior, ese año se dedicó a la documentación de la estructura naval del pecio (Vivar y Geli, 2016b).

En 2012 se prosiguieron los trabajos en la zona donde se finalizaron el año anterior y se avanzó en dirección a la proa, donde se hallaron en el camino más carga del navío la cual se componía principalmente por cajas de munición y piezas de artillería de diversas clases. Se realizó el mismo método de documentación: extracción y documentación de la estibación. En el año 2013 la zona de excavación se centró en la proa del palo mayor, donde se encontraron más elementos de la carga del barco, en concreto bombas de mortero a granel (Vivar y Geli, 2016b). Las bombas pesaban alrededor de 37 kg cada una, se encontraban ‘soldadas’ entre sí y a la estructural del barco debido a la concreción que habían generado (Vivar y Geli, 2016b, p. 7), por eso sólo se extrajo una parte de la carga.

Durante la campaña de 2014 se trabajó también en la zona de proa, inmediatamente después de la zona donde se habían hallado las bombas de mortero. En esta zona se encontraron barriles con piedras de pedernal, herraduras para equinos,

cepillos, correaes y también se encontraron números cabos adujados. Todo el material fue documentado, y extraído para dejar libre la carga que quedaba debajo y constituía la siguiente capa (Vivar y Geli, 2016b p. 7). En el 2015 se prosiguió en la capa que se había dejado libre del cargamento hallado en 2014, en este caso se documentaron la quilla y la sobrequilla, retirando también de esta zona la carga que no se pudo extraer en la anterior campaña. Durante el año 2016 se procedió a documentar la arquitectura naval del pecio una vez libre de su cargamento, se documentó la zona central del derrelicto, desde la carlinga al palo mayor. Se realizó el proceso de limpieza de la estructura del yacimiento del sedimento depositado en el mismo desde la campaña anterior, se marcaron y etiquetaron los elementos más significativos de la arquitectura del navío y se procedió a realizar la fotogrametría del mismo (Vivar y Geli, 2016b) p.9).

Por último, se procedió a cubrir el yacimiento, ya que se ha dado por finalizada la excavación y documentación del mismo en su totalidad a lo largo de todas las campañas arqueológicas, para evitar la degradación del derrelicto por la falta de aportación de sedimentos eluviales debido a la regresión de Delta del Ebro y agentes degradantes como el *teredo navalis*, agentes naturales o la pesca de arrastre y el expolio, se ha procedido a cubrir el mismo con sacos de arena. En total se han empleado unos 1500 sacos, lo que hace alrededor de 37500 kg de arena (Vivar y Mayoral, 2017, p. 11-12).

4.3.3. Método de documentación

Para la documentación del Deltebre I, se usó dos métodos diferentes en función de si lo que se iba a documentar era el cargamento o la arquitectura naval.

La carga de pecio fue documentada de dos formas distintas dependiendo de la visibilidad que hubiese. En caso de haber buena visibilidad se procedía a la realización de un fotomosaico. Para ello se colocaba sobre el cargamento un entramado de cuadros de 1m² formando una cuadrícula. Posteriormente se realizaba la cobertura fotográfica, centrando la imagen en el cuadro de 1m², para que posteriormente se pudiera montar el fotomosaico en el laboratorio para luego vectorizar los objetos (Vivar y Geli, 2014b, p. 4).

Si la visibilidad era mala, se realizaba mediante dibujo manual, colocando un cuadro de metal de 1m² sobre el cuadrado de la cuadrícula. Este cuadro metálico a su vez estaba subdividido en cuadrados de 10cm de lado, de esta forma resultaba fácil y rápido dibujar el material.

En lo que se refiere a la documentación de la arquitectura naval, la planimetría, se usaba un cuadro de dibujo nivelado de 6m x 4m de lado. Este cuadro a su vez, estaba

subdividido en carriles de 1m x 4m. Todas las barras tienen colocadas unas cintas métricas de costura, para poder dibujar mediante un eje de coordenadas cartesianas. El dibujo se realizará con lápiz y goma en una hoja de papel poliéster a escala 1:10 (Vivar y Geli, 2014b, p. 5). Esto permite que el dibujo se realice de forma sencilla y rápida ya que un metro en la realidad equivale a 10cm en el dibujo.

V. REALIZACIÓN DE UNA COBERTURA FOTOGRAMÉTRICA SUBACUÁTICA CON UN OBJETIVO ANALÍTICO

Este apartado pretende ilustrar al usuario a modo de guía básica para poder escoger el material y la forma más adecuada para la realización de la cobertura fotográfica del yacimiento, así como la elección del equipo informático para poder procesar las imágenes y realizar las fotogrametrías.

5.1. MÉTODO DE DOCUMENTACIÓN FOTOGRAMÉTRICA

5.1.1. Retos de la fotografía subacuática

El primer aspecto que se ha de tener en cuenta es el medio en el que trabajamos, el interior del agua, ya sea dulce o salada. Se trata de un medio más denso que el aire, con diferentes propiedades físicas en donde la luz adquiere un comportamiento distinto.

La luz, más específicamente la intensidad de la luz⁸, es en la fotografía uno de los aspectos más importantes que se han de tener en cuenta y como hemos comentado anteriormente, su comportamiento es diferente en el medio acuático. Nuestra fuente principal de luz es la del Sol, de una gran intensidad a lo largo de su recorrido desde su origen hasta la superficie del agua, que pierde aproximadamente un 49% de su intensidad en el momento que atraviesa la atmosfera. Este hecho se produce debido a la reflexión causada por las nubes, la dispersión causada por el propio aire y la absorción que se produce en entrar en contacto con las partículas de polvo y el ozono. Pero no es la única pérdida de intensidad que sufre la luz, al entrar en contacto con la superficie del agua esta experimentará otro proceso de reflexión, que será mayor cuanto más agitada se encuentre el agua, produciendo de este modo alrededor de una reducción del 50% de la intensidad en el primer metro de columna de agua. Así pues, cuanto más tranquila se encuentre la superficie del agua mayor será la penetración de la luz. Este porcentaje de pérdida lumínica al entrar en el agua se verá afectada también por la cantidad de partículas en suspensión (plancton y sedimentos) que se encuentren el agua.

Pero la intensidad no es lo único que perdemos al entrar en el medio acuoso, también se pierde el color, que implica también pérdida de intensidad, puesto que la luz está compuesta por diferentes longitudes de ondas que representan los colores, por lo que al ir perdiendo color perdemos intensidad. Siguiendo con la luz del sol, esta está

⁸ Es la cantidad de luz -ya sea natural o artificial- que genera una fuente luminosa.

clasificada como muchas otras como luz blanca. Esta denominación se debe a que está compuesta por diferentes colores cada uno con su longitud de onda. Al penetrar en el agua, en los primeros 10 metros ya perdemos los colores rojo, naranja y amarillo, es decir, los que tienen una longitud de onda más grande. Los siguientes 10 metros perdemos el violeta y el verde. Finalmente, de los 20 a los 30 metros sólo penetra la luz azul y antes de los 40 metros ya necesitamos luz artificial para poder observar correctamente los objetos (ver Fig.- 6). Estos datos son aproximados, todo dependerá de diferentes factores del agua, salinidad, movimiento en superficie, partículas en suspensión, etc. Así pues, podemos decir que el agua actúa como un gran filtro azul. Hemos de tener en cuenta también que esta pérdida de color, se produce tanto de forma vertical como en horizontal.

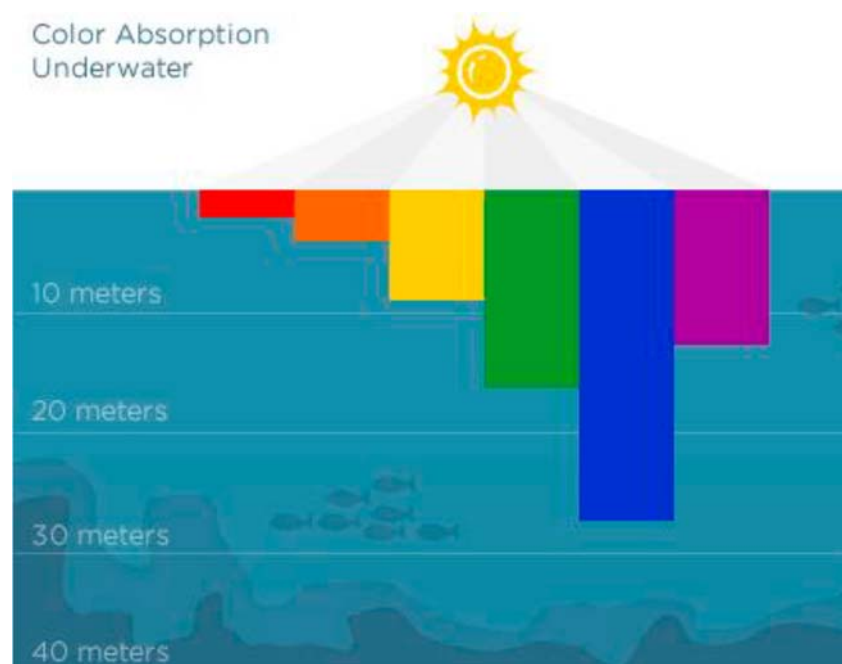


Fig.- 6 Gráfico pérdida de color, extraído de Van Damme (2015, p.19, Fig. 14).

Para corregir la pérdida de color podemos hacer uso de focos subacuáticos de luz blanca, estos ayudarán a restituir de forma aproximada los posibles colores verdaderos de los objetos. Además, podemos emplear junto a los focos una carta de color o usar la carta sola, para así tener una referencia lo más fiel posible del color verdadero, para posteriormente en el laboratorio procesar las imágenes resultantes restituyendo así los colores verdaderos. Existen muchos tipos de cartas de colores, desafortunadamente, hasta hace bien poco todas estaban pensadas para fotografía en superficie y no eran resistentes al agua, por lo que para poder trabajar en condiciones aptas se tenían que plastificar, hecho que podía producir errores si no se hacía correctamente, haciendo que se reflejase la luz y no se captase correctamente el color. Otro inconveniente es que si el sellado de la carta no es el idóneo es posible que se produzcan filtraciones de agua, esto conlleva a que deteriore la carta pudiendo producir

la pérdida de esta. Actualmente existen marcas especializadas en la fabricación de cartas de colores aptas para el uso subacuático.

Finalmente, el último aspecto a tener en cuenta es la distorsión que se produce al tomar una foto bajo el agua debido a la difracción. Este hecho existe, en menor medida en superficie debido a la lente de la cámara. En el medio subacuático esto se intensifica, ya que la luz pasa por dos lentes, la de la carcasa estanca de la cámara y la de la del objetivo de la cámara, y porque la luz cambia de un medio acuoso a uno aéreo produciendo un cambio en el ángulo de la luz producido por la difracción. Esta deformación se corrige fácilmente con la lente de la carcasa estanca preparada especialmente para ello, pero aun así siempre existe una distorsión que se corregirá en el laboratorio con los programas adecuados.

5.1.2. Equipo fotográfico

Actualmente existe en el mercado una gran variedad de cámaras y accesorios que permiten la fotografía subacuática, desde cámaras compactas réflex o *Mirror-Less* (Moya, 2017, p. 43-42; Linder 2016, pp. 4-8), por lo que podremos adaptarnos a nuestras necesidades y presupuesto. Aun así, hay ciertos aspectos técnicos que tendremos que tener en cuenta a la hora de elegir una cámara u otra.

- El sensor: su tamaño afecta al ángulo de visión y a la profundidad de campo⁹. Cuanto mejor sea, los píxeles mostraran mayor detalle en las zonas poco iluminadas (Charquero Ballester, 2016, p. 143).
- Cantidad de megapíxeles: se verán condicionados por el equipo informático que usaremos para procesar las imágenes para realizar la fotogrametría (Charquero Ballester, 2016, p. 143).
- El objetivo: existen muchos tipos, pero en la documentación bajo el agua los más recomendados son los angulares y los grandes angulares (entre los 35mm y los 12mm). Para casos concretos se podrá usar el macro para obtener fotografía de gran detalle.
- Pantalla LCD: este hecho nos facilitara la comprobación de la foto tomada en el agua de forma fácil y clara (Moya, 2017, p. 46).

Relacionado con la cámara que hemos de elegir, tal y como apunta Moya en su obra (Moya, 2017, p. 57), un aspecto importante a elegir es la tarjeta de memoria que emplearemos para guardar las fotos que realicemos de la cobertura. Estas pueden ser de formato SD (*Secure Digital*) o CF (*Compact Flash*). El formato más usado es el SD,

⁹ Es el espacio nítido que aparece por delante y por detrás del objetivo enfocado.

aunque actualmente está cayendo en desuso, dicho formato ha evolucionado a SDHC (hasta 32 GB de memoria) y SDXC (por encima de los 64 GB de memoria).

A parte de la capacidad de almacenaje, hemos de tener en cuenta la velocidad en la que graba la tarjeta. Es decir, no nos sirve solamente que pueda guardar muchas fotos, sino que, al encontrarnos bajo el agua y dependiendo de la profundidad nuestro tiempo de fondo puede ser muy corto, necesitamos que la información obtenida se guarde lo más rápido posible en la tarjeta para que el tiempo entre foto y foto sea muy corto. Es, por eso que aparte de los Gigas de almacenaje nos hemos de fijar en la velocidad de escritura, medida en MB/s, por lo que a mayor velocidad habrá menor tiempo entre la toma de una foto y la otra (Moya, 2017, p. 59).

Una vez tenemos claro esto, hemos de decidir en qué formato guardar las fotografías en la tarjeta de memoria. En la mayoría de las cámaras se puede guardar de tres formas JPEG, RAW y RAW+JPEG. El formato RAW, vendría a ser como los antiguos negativos de las cámaras analógicas, sería la imagen sin ningún tipo de compresión por lo que no perderíamos calidad en la fotografía. El formato JPEG, es un formato de compresión estandarizado que permite generar imágenes de poco tamaño. Para realizar la fotogrametría nos interesa la mayor calidad para que el programa reconozca los puntos de conexión, por lo que la mejor opción sería el formato RAW el problema es que para trabajar con este tipo de imágenes, debemos usar programas especiales como el *Camera RAW* de *Photoshop* para exportarla a otro formato. El que menor calidad pierde sería el TIFF. Pero si resulta que el programa no toma todas las fotografías o no resulta el modelo como esperábamos, si elegimos esta opción perdemos bastante tiempo, por lo que al final, la mejor opción es la tercera que comentábamos: la RAW+JPEG. Este formato, cuando tomamos una foto, generamos la misma imagen en dos formatos, JPEG y RAW, por lo que tenemos duplicada la información. Aunque pueda parecer una pérdida de espacio, al tener dos formatos, podemos usar las imágenes en JPEG para hacer una primera prueba en baja calidad a ver si el programa reconoce todas las fotografías y en caso afirmativo, ya con la foto en formato RAW, aplicar retocarla y guardarla en formato TIFF y realizar el modelo fotogramétrico con mayor calidad y detalle.

Además, tal y como se puede observar en la obra de Moya (Moya, 2017, p. 57), la cantidad de fotografías que podemos hacer en función de la capacidad es la siguiente:

- 8 GB: 320 fotos
- 16 GB: 640 fotos
- 32 GB: 1280 fotos
- 64 GB: 2560 fotos

Para este trabajo hemos usado una cámara *Mirror-Less Olympus E-M5* con pantalla LCD, con un objetivo de 12mm y una carcasa estanca para dicho modelo. El formato en que se guardan las fotografías es RAW+JPEG.

5.1.3. Calibración cámara

Como hemos comentado anteriormente, la luz al cambiar de un medio a otro experimenta varios procesos físicos que pueden llegar a distorsionar la imagen resultante, hecho que podría alterarnos las formas y dimensiones de modelo fotogramétrico que queramos realizar. Del mismo modo, ya hemos comentado como corregir esto, pero como ya anunciábamos aún con esta corrección mecánica, es considerablemente apropiado realizar una corrección de forma digital previa al procesado. En nuestro caso, dichas correcciones serán aplicadas por el propio programa en el momento de procesar las imágenes para realizar el modelo fotogramétrico, pero previamente debemos calibrar la cámara.

Para el proceso de calibración de la cámara usaremos el programa *Agisoft Lens*¹⁰. Este programa/herramienta es muy sencillo e intuitivo. Primero necesitamos una tabla de calibración a la que fotografiar, el programa que tiene la opción para generar una, trabaja con una tabla similar a un tablero de ajedrez. Es recomendable que la toma de fotos con la tabla de calibración se realice siempre antes de hacer la cobertura, ya que cada medio en que se realice la toma de fotos tiene unas propiedades diferentes. Por ejemplo, la luz no viaja de la misma forma en agua salada que en agua dulce. También dependerá de la cámara que se use y la configuración de esta. En nuestro caso, para facilitar la toma de fotos en el yacimiento y que el tiempo sea menor, se ha realizado una sola calibración con el tablero en una piscina¹¹, puesto que la cámara que se empleará siempre será la misma y, con el mismo objetivo. Este proceso de calibración se tendrá que hacer con cada una de las cámaras con las que vayamos a trabajar. En nuestro caso se realizaron un total de 138 fotografías de un tablero de ajedrez de metacrilato en diferentes ángulos y distancias (ver *Fig.- 7*) para que el programa pueda elaborar los parámetros de corrección con mayor precisión.

¹⁰ Este programa se instala en nuestro equipo cuando instalamos el *Agisoft PhotoScan*.

¹¹En las instalaciones del Departamento de robótica de la *Universitat de Girona*.



Fig.- 7 Diferentes fotos del tablero en varios ángulos y distancias. Fuente: CASC.

Una vez tengamos las fotografías, estas se han de cargar en el programa y a continuación le indicamos que calibre para que obtenga los parámetros de calibración. Este proceso tardará más o menos dependiendo de la cantidad de fotografías que procese y del equipo en el que trabajemos. Con la cantidad de fotos que hemos procesado y el equipo con el que se ha hecho, esta operación se demoró 15 minutos. El programa ejecuta funciones matemáticas donde resuelve la distorsión que hay y cuáles son los valores que ha de usar para corregir la imagen que vemos distorsionada (ver Fig.- 8). Al finalizar este proceso el programa devuelve unos parámetros, que son los que usará posteriormente para corregir las fotos que se realizaran y unos gráficos que representan el grado de distorsión, entre otros datos. Finalmente, sólo queda guardar los resultados en un archivo XML que es el que cargaremos en el *PhotoScan* cuando queramos procesar las fotografías realizadas con nuestra cámara¹².

¹² Cada vez que se cambie la configuración de la cámara, ya sea el modelo, el objetivo o la carcasa se tendrá que volver a calibrar la cámara.

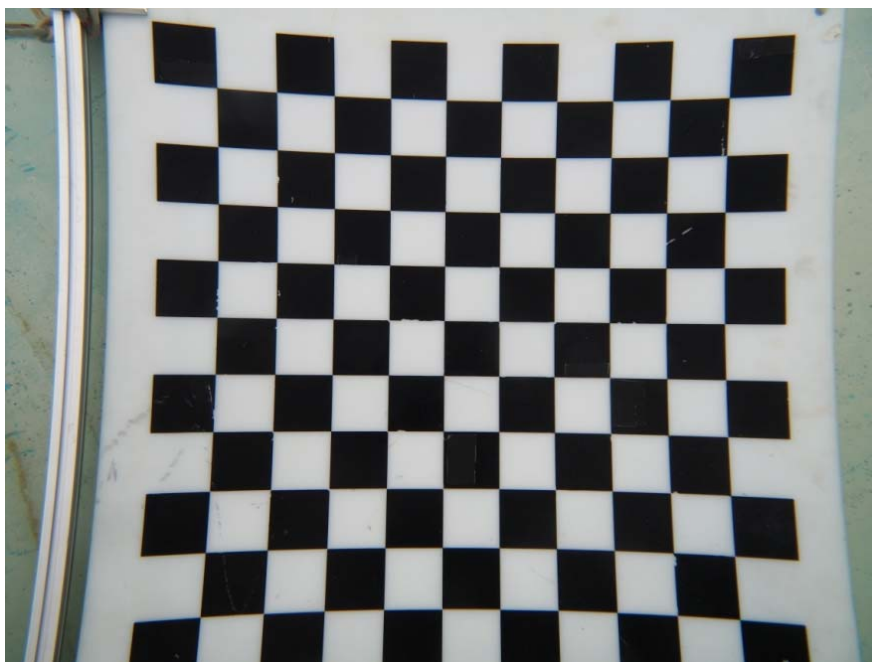


Fig.- 8 Detalle de la distorsión que se produce al tomar fotos bajo el agua con la cámara *Olympus E-M5* y su carcasa. Fuente: CASC.

5.1.4. Cobertura fotográfica

Esta parte del proceso es la más importante, ya que de ello dependerá que se genere correctamente el modelo fotogramétrico con la máxima precisión y resolución. Por ese motivo la estrategia para realizar la cobertura requiere una planificación previa para cubrir todo el yacimiento sin dejarse ángulos sin cubrir y sin extralimitarse en la cantidad de fotos, una mayor cantidad de fotografías no implica mayor resolución en el modelo y aparte, hay que tener en cuenta que a mayor número de fotografías más potente ha de ser el equipo que las procese.

Existen diferentes tipos de coberturas fotográficas para levantar un modelo 3D. Cada una de ellas dependerá de lo que queramos hacer.

- Fachada
- Interior
- Objeto aislado
- Fotografía aérea

En nuestro caso, se trata de documentar un yacimiento subacuático, más concretamente un pecio. La estrategia a seguir en el caso de estudio, dos pecios completamente excavados, sería la de realizar una mezcla entre una cobertura para una fotografía aérea, por carriles con un solape entre fotografías de entre un 60% y un 80% (manual *PhotoScan*, 2017, p. 8), y una cobertura de un objeto aislado tal y como se

describe en el manual de usuario del programa¹³ (ver Fig.- 9). El resultado de esta combinación sería una especie de cúpula fotográfica, con lo que conseguiríamos no dejar ninguna zona por capturar. Para que al programa le sea mucho más fácil el reconocimiento de puntos, realizaremos primero o al finalizar, unas fotos en conjunto del pecio para que el programa interprete la forma general del mismo, y luego realizaremos otra tanda a una distancia más próxima al pecio para obtener mayor detalle de los elementos de arquitectura naval. Estas tomas fotográficas en detalle facilitarán en gran medida la realización de estudios posteriores. El resultado se puede observar en la Fig.- 10 donde los recuadros azules representan las posiciones donde se han tomado las fotografías.

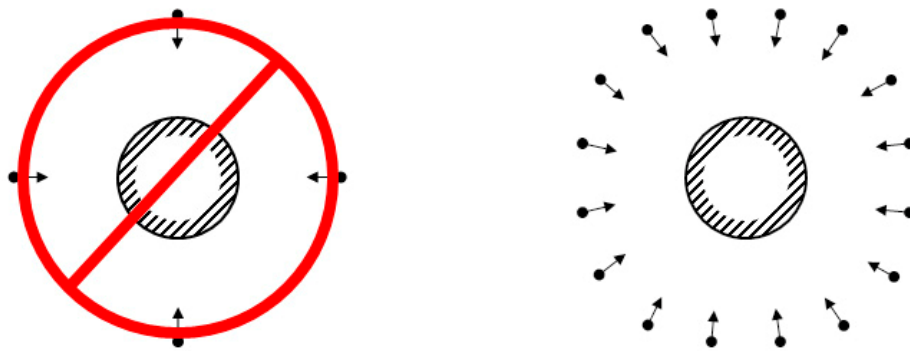


Fig.- 9 Cobertura teórica de un objeto aislado, extraído del manual de Agisoft PhotoScan 1.3 (2016, p.9).

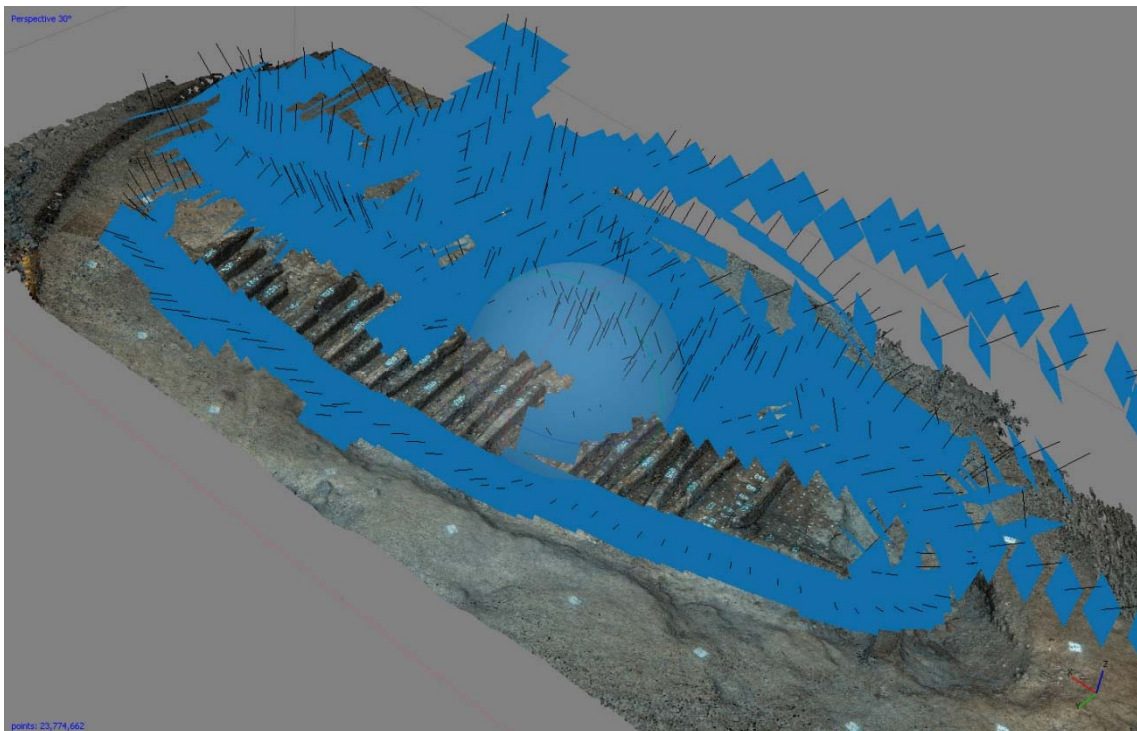


Fig.- 10 Ejemplo de cobertura del pecio Cala Cativa I. Fuente: elaboración propia.

¹³http://www.agisoft.com/pdf/PhotoScan-pro_1_3_en.pdf

Otros aspectos importantes que se han de tener en cuenta en el proceso de la cobertura del pecio son:

- La correcta excavación del pecio o sección que se quiera documentar.
- Etiquetaje y marcaje de las estructuras y elementos de construcción naval.
- Todo lo que se quiera documentar, lo máximo libre de sedimento.
- Si se va a documentar por tramos y sección, intentar dejar limpio un poco más allá de la zona que se quiera documentar, para que así, cuando se junten el total de fotografías parezca que se realizaron todas en el mismo momento. Esto es muy útil cuando el pecio que se quiere documentar es muy grande y se sedimentan muy rápidamente las partículas en suspensión.
- El uso de una tabla de color para posteriormente en el laboratorio intentar recuperar los colores verdaderos, y facilitar así la generación del modelo 3D y su posterior estudio. Para ello realizaremos una o varias fotografías iniciales en el yacimiento antes de realizar la cobertura.
- El uso de elementos de medida, como jalones para establecer medidas de referencia y poder escalar correctamente el modelo 3D, además de que toda documentación fotográfica en arqueología, ha de tener algún elemento métrico de referencia.

5.1.4.1. *Colorchecker*

Como ya hemos mencionado antes, el uso de una tabla de color o también denominado *Colorchecker*, es una herramienta muy útil para la gestión del color en las fotografías. Hemos de partir de la base, que cada compañía fabrica sus cámaras fotográficas con unos parámetros de color diferentes las unas de las otras, eso mismo pasa tanto con pantallas, como con impresoras y con programas de edición de fotografía. Es por eso que muchas veces una imagen no se ve con la misma tonalidad de color en un equipo o en otro.

Por este motivo, ya hace unos años que en el mundo de la fotografía profesional han empezado a aparecer las denominadas tablas de color. Son unas cuadrículas de colores (ver *Fig. 11*), una paleta de colores, con unos valores estandarizados para cada color. El objetivo de esto es que nos permita, cuando tomemos una foto de la tabla con cualquier marca de cámara, corregir en el ordenador y mediante un programa que facilita la casa que ha fabricado el *Colorchecker* los colores y normalizarlos, es decir, que tengan los mismos valores independientemente de la cámara que se haya empleado.



Fig.- 11 Tabla de color *SpyderCheckr* de 24 colores, de la casa Datacolor. Fuente: elaboración propia.

En este trabajo se ha empleado la tabla de color *SpyderCheckr* plastificada para poder trabajar con ella bajo el agua, puesto que este modelo de tabla no está pensado para ser sumergible. Durante el transcurso de este trabajo ha salido al mercado una tabla de color de la casa *DGK Color Tools* preparada para ser sumergible (la WDKK).

Pero, esta tabla no se emplea únicamente para normalizar los colores entre cámaras u otros equipos, también se usa para cuando entre fotografía y fotografía la luz ha cambiado de intensidad o de color: amanecer, mediodía, atardecer, etc.

En la documentación de yacimientos subacuáticos, esta herramienta nos será de mucha utilidad, ya que como ya hemos explicado al principio de este capítulo, el agua funciona como un filtro, impidiendo que la luz viaje hasta donde se encuentra el yacimiento con todo el espectro de colores, a diferente profundidad iremos perdiendo tonalidades de color, haciendo que lo veamos todo azulado. Otro inconveniente añadido es que, si el yacimiento es muy grande y se requiere de más de un día para realizar toda la cobertura, muy probablemente la luz no sea la misma.

Así pues, si realizamos una o varias fotografías a la tabla de color y posteriormente a la zona en la que deseamos levantar el modelo, podremos corregir el color de las imágenes, aunque hayan sido tomadas en varios días diferentes, y que estas

recuperen su color original eliminando la tonalidad azulada (ver Fig.- 12). El hecho de querer usar el color que tienen los objetos es esencial por dos motivos, para que al programa le sea más fácil reconocer los puntos en común entre fotografías y para generar el 3D. Pero sobre todo para posteriormente poder emplear el modelo 3D para su estudio.



Fig.- 12 La misma tabla de color, una bajo el agua (Izda.) y la misma pero habiendo normalizado el color (Dcha.). Fuente: elaboración propia.

5.2. PROCESADO DE IMÁGENES

Una vez realizadas las fotografías debemos editarlas, como ya hemos mencionado anteriormente, para que de este modo el programa pueda generar el modelo 3D en menor tiempo y de forma más rápida. Con esta corrección también podremos posteriormente trabajar con él modelo 3D, tanto para su estudio como para la creación de planimetrías.

Llegados a este punto, se ha de tener en cuenta que el equipo que empleemos para trabajar y procesar las imágenes ha de cumplir unos requisitos mínimos, con el objetivo de poder trabajar correctamente y de forma eficiente con los programas que necesitemos, evitando innecesarios fallos o interrupciones del normal funcionamiento del mismo. Si no se llega a unos requisitos mínimos podríamos vernos en la tesitura de no poder realizar las operaciones necesarias para ejecutar una instrucción. Por ese

motivo a continuación se explicarán las características que necesita nuestro equipo para poder trabajar con los programas que emplearemos:

- *Adobe Illustrator CC* para digitalizar las planimetrías y secciones.
- *Adobe Photoshop CC* (más concretamente el *plugin Camera RAW*), para la gestión del color y la creación de filtros a partir de la tabla de color.
- *Agisoft PhotoScan*, para generar los modelos 3D mediante la fotogrametría.

5.2.1. Equipo informático

La elección de un equipo informático esta intrínsecamente relacionado con el uso que le vamos a dar. A modo de ejemplo, no tienen las mismas características técnicas un ordenador doméstico (navegación, ofimática, visionar videos, etc.), que uno para jugar o uno para trabajar con modelos 3D de grandes dimensiones, lo que implica una gran cantidad de polígonos. Por ello hemos de tener bien claro qué función le vamos a dar y cuáles serán los principales programas que usaremos y que especificaciones técnicas requieren estos para poder trabajar correctamente. A partir de estos datos podremos saber si nuestro equipo podrá trabajar correctamente o por el contrario tendremos que ir pensando en usar otro.

Como ya hemos mencionado, para realizar este proyecto hemos trabajado principalmente con el *Adobe Illustrator (Ai)*, *Adobe Photoshop (Ps)* y *Agisoft PhotoScan*. Así pues, lo primero que tenemos que hacer es comprobar las especificaciones técnicas que requiere cada aplicación para constatar cuál es la que más recursos va a necesitar y si el equipo cumple con las mismas. Actualmente, dicha información se halla normalmente en las webs oficiales de los programas, por lo que únicamente debemos buscarlo allí.

Por norma general, las especificaciones técnicas de las aplicaciones suelen hacer referencia a:

- Sistema operativo: Windows, Mac OS, Linux...
- CPU: tipo y velocidad de procesado
- Memoria RAM
- Espacio de disco duro
- Tarjeta gráfica

De estas tres aplicaciones, la que menos requisitos exige es *Adobe Illustrator* y la que más *PhotoScan*, por lo que será este programa el que nos determinará el equipo que necesitamos para trabajar. Lo más importante para el correcto funcionamiento de *PhotoScan* según sus desarrolladores es la memoria RAM, y avanzándonos un poco en

cómo funciona el programa (que será explicado en apartados posteriores), esto es así, puesto que para la construcción del modelo (la geometría del objeto) es donde mayor cantidad de memoria se requiere si estamos hablando de modelos de calidad media a muy alta.

Para hacernos una idea y citando las especificaciones que dan los propios desarrolladores en la web¹⁴, a continuación mostraremos una tabla donde nos explican la cantidad de uso de memoria necesaria para los diferentes pasos que sigue el programa para generar un modelo 3D¹⁵.

Como se puede observar en las tablas que mostramos a continuación, a mayor cantidad de fotografías necesitamos mucha más memoria para poder procesar las tareas descritas correctamente. En el caso de que nuestro equipo disponga de menos memoria que la que se expone en las tablas para procesar las fotografías que hemos realizado para generar nuestro modelo, podemos encontrarnos que el tiempo que tarde, se incrementa exponencialmente según la calidad que queríamos trabajar o incluso peor, que no pueda procesar las imágenes

Fotografías	100	200	500	1000	2000	5000	10000
Memoria consumida	500 MB	1 GB	2.5 GB	5 GB	10 GB	25 GB	50 GB

Tabla 1 Memoria que se necesita para orientar las fotografías en función de la cantidad de estas.

Fotografías	20 - 50	100	200	500
Mínima	100 MB - 300 MB	150 MB - 450 MB	300 MB - 1 GB	1 GB - 3 GB
Baja	500 MB - 1.5 GB	750 MB - 2.2 GB	1.5 GB - 4.5 GB	4 GB - 12 GB
Media	2 GB - 6 GB	3 GB - 9 GB	6 GB - 18 GB	15 GB - 45 GB
Alta	8 GB - 24 GB	12 GB - 36 GB	24 GB - 72 GB	60 GB - 180 GB
Máxima	32 GB - 96 GB	48 GB - 144 GB	96 GB - 288 GB	240 GB - 720 GB

Tabla 2 Memoria necesaria para generar el modelo (crear la malla) según la cantidad y calidad de las fotografías con que trabajemos.

El segundo aspecto importante que resaltan los desarrolladores que hemos de tener en cuenta es la CPU, el procesador, que es el encargado de realizar todas las operaciones para generar los modelos 3D. Así pues, cuanto más rápido mejor, estableciendo como mínimo una velocidad de 3GHz¹⁶ o superiores. En la actualidad

¹⁴http://www.agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/PhotoScan_Memory_Requirements.pdf

¹⁵Estos pasos serán descritos en el apartado "6.2.2.2. Agisoft PhotoScan" de este trabajo.

¹⁶ La velocidad de procesamiento se mide en la frecuencia que es capaz de realizar operaciones con un tic de reloj y se mide en Hz, así pues, a cuanto más frecuencia mayor velocidad de cálculo.

existen en el mercado infinidad de procesadores que se clasifican según la cantidad de núcleos que están compuestos: 4 (quad-core), 6 (hexa-core), 8 (octa-core), etc. hasta 12. El núcleo del procesador sería la unidad mínima, que es la encargada de realizar los cálculos, por lo que, a la hora de elegir un procesador, debemos tener en cuenta la cantidad de núcleos que dispone y la velocidad a la que estos procesan.

Finalmente, el tercer aspecto que hemos de tener en cuenta es la tarjeta gráfica (GPU). Una buena tarjeta gráfica facilitará la velocidad de procesamiento y disminuirá el tiempo de finalización del proceso cuando se realice la búsqueda de puntos comunes de conexión entre fotografías y para la generación de la nube densa de puntos. Para ello recomiendan el uso de las denominadas tarjetas de *Gaming* (diseñadas para el sector videojuegos), puesto que pueden trabajar con millones de polígonos en pocos segundos. Aunque para trabajar con objetos en 3D de forma profesional existen tarjetas diseñadas específicamente para ello, como las Cuadro de NVIDIA o las *ProRender* de ATI, pero su coste es demasiado elevado para el usuario común. Por ese motivo sale más rentable usar una tarjeta de características enfocadas al ámbito *Gaming* para el equipo.

Para facilitar al usuario la elección del equipo o ver si con el que dispone podrá trabajar correctamente, en la web se ha clasificado los equipos en tres grupos, principalmente en función de la memoria RAM y del tipo de procesadores y tarjetas gráficas que ha de disponer:

- Configuración básica: de 16GB mínimo de memoria RAM hasta 32GB y procesador con un mínimo de 4 núcleos.
- Configuración avanzada: de 32GB a 64GB de memoria RAM y procesadores de 6 a 8 núcleos.
- Configuración extrema: más de 64GB de RAM y con procesadores con 9 o más núcleos.

Para este trabajo hemos utilizado un ordenador portátil con 16GB de memoria RAM, una gráfica de *Gaming* de NVIDIA (GeForce GTX 860M) y un procesador de 8 núcleos a 2,6GHz.

5.2.2. Programario

A continuación, se va a explicar por orden como debemos proceder para generar un modelo fotogramétrico, los programas que emplearemos para procesar las imágenes serán *Adobe Photoshop Camera RAW* y posteriormente *Agisoft PhotoScan*.

5.2.2.1. Photoshop Camera RAW

Como ya se ha ido dejando entrever anteriormente, todas las imágenes tomadas en el yacimiento se tendrán que procesar para obtener un resultado óptimo para su posterior tratamiento con el programa y aplicación de las correcciones pertinentes. Para ello trabajaremos con imágenes en formato RAW, que conservan todas las características originales sin compresión alguna.

Para la corrección del color hemos usado el *plugin* del *Camera RAW* que se encuentra en el programa *Adobe Photoshop*. Para corregir el color lo que hacemos es cargar en él la fotografía que le hemos hecho a la tabla de color. En nuestro caso la tabla es una *SpyderCheckr* de 24 colores plastificada para poder usarla bajo el agua. Primero empleamos la herramienta de *balance de blancos* y se lo aplicamos a la casilla que corresponde con la 2E de la *Fig.- 13*. Una vez hecho esto observamos como los colores han cambiado asemejándose, en algunos casos, a los colores reales.



Fig.- 13 Tabla *SpyderCheckr* de 48 colores. Fuente: elaboración propia basada en Manual *SpyderCheckr*.

Ahora establecemos seis puntos de control en las casillas 2E, 2F, 3F, 3G, 6G y 6H para comprobar los valores de R (rojo), G (verde) y B (azul) se corresponden o se aproximan lo máximo posible a los que aparecen en la tabla Adobe RGB (ver *Fig.- 14*) y en caso de no ser así iremos modificando el tono, contraste y saturación de todos los colores en general o en algunos en concreto. Una vez los seis puntos de control se asemejan o son iguales a los de la tabla generamos un filtro con el nombre del yacimiento y la fecha de cuando se realizó la toma de fotografías. El motivo del uso de la tabla de color, aparte de intentar obtener el color verdadero de las fotografías, es que,

si realizamos la toma de imágenes en diferentes días a diferentes horas es probable que la luz no sea la misma, de este modo nos aseguramos que todas las fotografías tomadas tengan un color similar entre ellas, hecho que facilitará al programa que genere el modelo correctamente.

2E	20% Gray	80.44	1.17	2.05	202	198	195	199	196	193
3E	40% Gray	65.52	0.69	1.86	161	157	154	158	156	153
4E	60% Gray	49.62	0.58	1.56	122	118	116	120	118	115
5E	80% Gray	33.55	0.35	1.4	80	80	78	81	81	79
6E	Card Black	16.91	1.43	-0.81	43	41	43	46	46	47
1F	Primary Cyan	47.12	-32.5	-28.75	0	127	159	39	126	157
2F	Primary Magenta	50.49	53.45	-13.55	192	75	145	167	76	141
3F	Primary Yellow	83.61	3.36	87.02	245	205	0	234	204	37
4F	Primary Red	41.05	60.75	31.17	186	26	51	159	32	53
5F	Primary Green	54.14	-40.8	34.75	57	146	64	94	145	71
6F	Primary Blue	24.75	13.78	-49.48	25	55	135	41	58	132
1G	Primary Orange	60.94	38.21	61.31	222	118	32	198	117	44
2G	Blueprint	37.8	7.3	-43.04	99	86	96	70	89	156
3G	Pink	49.81	48.5	15.76	195	79	95	170	80	94
4G	Violet	28.88	19.36	-24.48	83	58	106	78	61	104
5G	Apple Green	72.45	-23.6	60.47	157	188	54	165	186	69
6G	Sunflower	71.65	23.74	72.28	238	158	25	218	157	46
1H	Aqua	70.19	-31.9	1.98	98	187	166	130	186	166
2H	Lavender	54.38	8.84	-25.71	126	125	174	125	124	171
3H	Evergreen	42.03	-15.8	22.93	82	106	60	90	106	65
4H	Steel Blue	48.82	-5.11	-23.08	87	120	155	98	119	152
5H	Classic Light Skin	65.1	18.14	18.68	197	145	125	183	144	125
6H	Classic Dark Skin	36.13	14.15	15.78	112	76	60	103	77	63

Fig.- 14 Tabla de valores RGB (3 últimas columnas) de *SpyderCheckr* de 48 colores (para ver la tabla entera ver anexos). Fuente: elaboración propia basada en Manual *SpyderCheckr*.

Una vez tenemos el filtro o los filtros generados, cargamos las fotografías del día que fueron tomadas y le aplicamos a todas las imágenes el filtro en cuestión. Posteriormente guardamos una copia, en formato TIFF (para mayor calidad) o en formato JPEG, para no modificar la imagen RAW original, y ya tenemos las fotos preparadas para cargarlas en *PhotoScan*.

5.2.2.2. Agisoft PhotoScan

Debido a que el uso del programa *PhotoScan* es muy intuitivo y no comporta ninguna dificultad a primera vista, a continuación, procederemos a indicar de forma simple los pasos a seguir por el usuario para generar un modelo fotogramétrico 3D viable y útil para su estudio posterior.

En primer lugar, cargaremos todas las fotografías en las que hayamos corregido el color. Luego, antes de hacer nada, cargaremos el archivo que generamos con *Agisoft*

Lens con la calibración de la cámara, para que así al generar el modelo corrija la distorsión que pueda haber en las fotografías. Una vez hecho esto procederemos a la orientación de las fotografías que hace automáticamente el programa. En este proceso el programa buscará los puntos de conexión, que él cree, que existen entre las distintas fotografías, generando así una nube dispersa de puntos (ver *Fig.- 15*). La cantidad de puntos variará en función de la calidad en que queramos que realice la acción el programa.

Como ya hemos mencionado antes, en función de la calidad que seleccionemos para realizar la fotogrametría en el programa, la cantidad de fotografías y el equipo del que disponemos, tardará más o menos tiempo o simplemente no lo ejecutará.

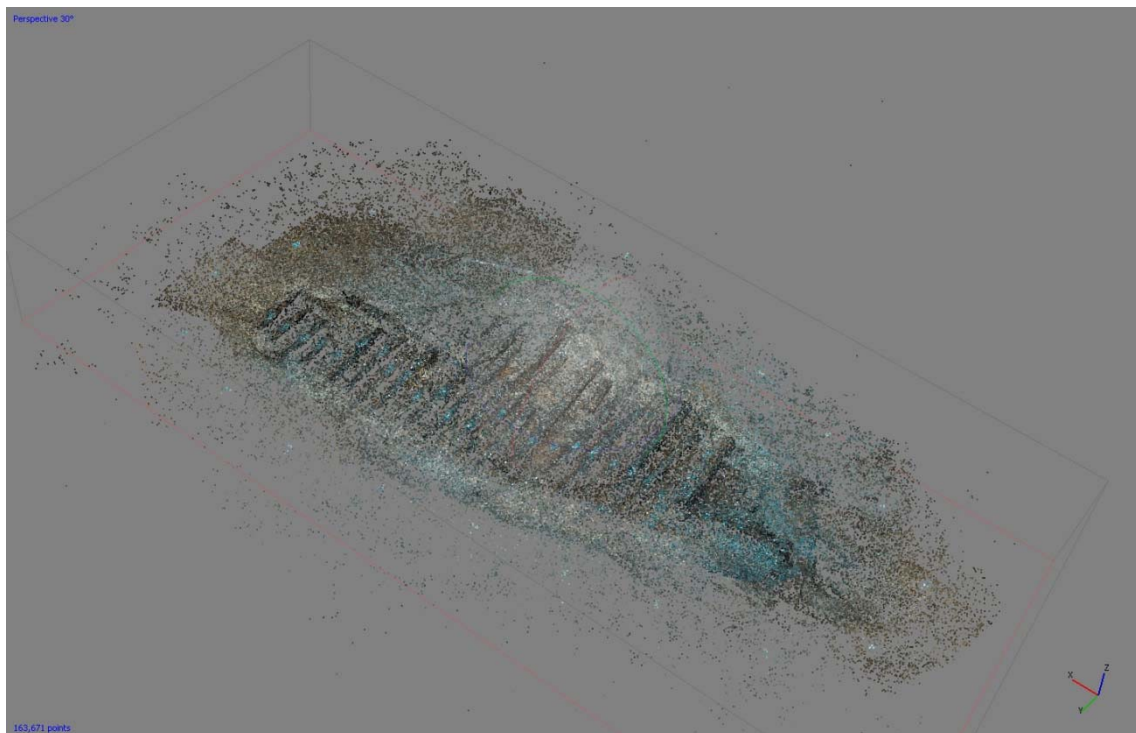


Fig.- 15 Ejemplo de nube dispersa del yacimiento Cala Cativa I con 163.671 puntos. Fuente: elaboración propia.

El siguiente paso, es opcional, pero si se realiza obtendremos un modelo mucho más preciso. Nos estamos refiriendo a la realización de una nube densa de puntos. Las nubes de puntos -ya sean dispersas o densas-, como su nombre indica son puntos que guardan información de la posición y del color en ese punto en concreto. La diferencia entre una y otra es la cantidad de puntos que se generan, como se puede observar entre la *Fig.- 15* y la *Fig.- 16*.

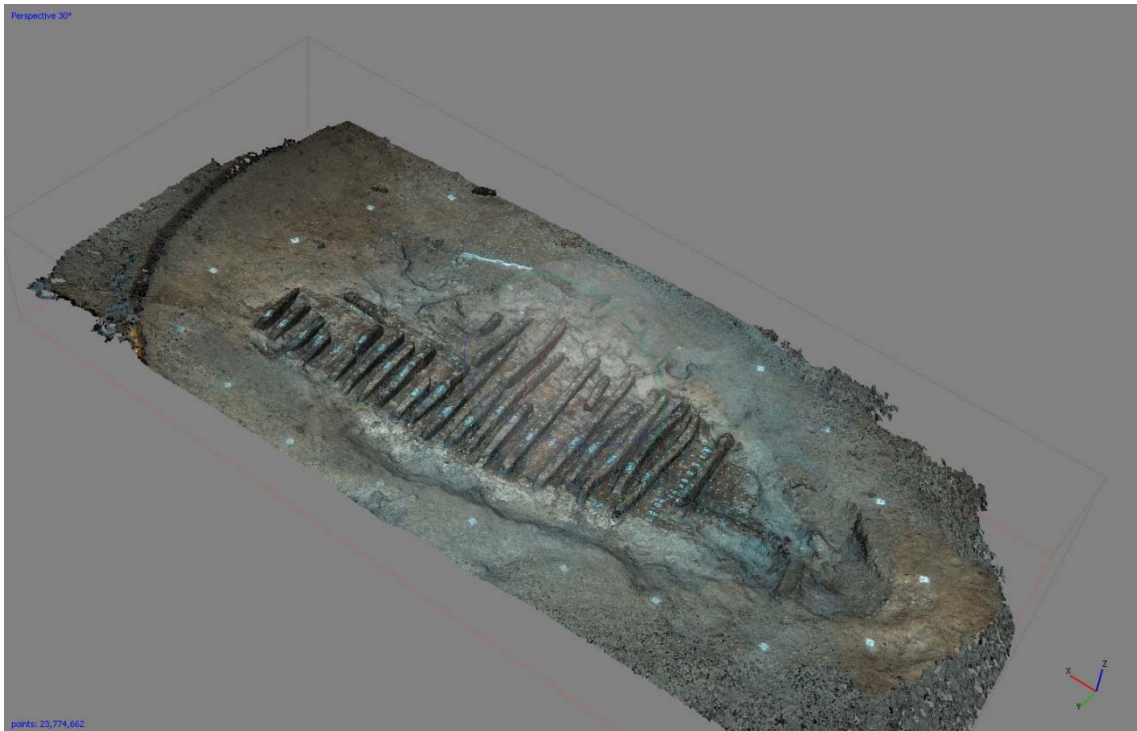


Fig.- 16 Ejemplo de nube densa del yacimiento de Cala Cativa I con 23.77.662 puntos. Fuente: elaboración propia.

Una vez generada la nube de puntos, se procede a generar la malla usando la nube dispersa o la densa. Es muy recomendable el uso de la nube densa de puntos, ya que el modelo que obtendremos tendrá las formas muchísimo más detalladas. Si se emplea la nube densa de puntos no sería necesario generar las texturas, puesto que se generará una malla con la información de color contenida en los puntos (ver Fig.- 17).



Fig.- 17 Ejemplo de malla generada con nube densa de puntos. Fuente: elaboración propia.

Aun así, procederemos a generar la textura de la malla, que se realizará promediando las fotografías y colocándolas encima del modelo, ya que nos servirá para poder identificar los detalles y poder realizar un correcto estudio de los elementos de la arquitectura naval.

Para poder trabajar con el modelo debemos escalarlo, puesto que el programa, cuando genera un modelo en 3D le da unos valores métricos que cree oportunos. Para ello, marcamos en el modelo, mediante el uso de marcadores, dos puntos que conozcamos para establecer una medida. En este caso emplearemos el jalón que fue colocado en el yacimiento para la toma de fotografías (ver Fig.- 18). Una vez, establecida la medida, el programa escalará automáticamente todo el modelo 3D y podremos empezar a realizar las mediciones.



Fig.- 18 Colocación de los marcadores en el jalón y asignación del valor entre los dos puntos (valor del tercer recuadro de la izquierda). Fuente: elaboración propia.

Finalmente, ya sólo queda generar el ortomosaico para posteriormente exportarlo a una imagen en formato TIFF o JPEG para trabajar con ella en *Adobe Illustrator* y generar las planimetrías y/o secciones necesarias.

Este proceso aquí descrito se ha realizado tanto para el yacimiento de Deltebre I como el de Cala Cativa I (del cual corresponden las imágenes mostradas en las figuras anteriores)¹⁷.

¹⁷ Para ver todos los pasos de los distintos modelos 3D realizados ver anexos.

VI. COMPARATIVA ENTRE DIBUJO TRADICIONAL Y FOTOGRAMETRÍA

En el siguiente apartado procederemos al análisis de las planimetrías tradicionales y por fotogrametría de los pecios de Cala Cativa I y Deltebre I. El análisis de ambos métodos de documentación se realizará por medio de una comparativa visual, posteriormente se procederá a generar un cotejo a través de la toma de medidas en ambos soportes documentales.

6.1. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE CALA CATIVA I

El procesado de las imágenes de las campañas de 2015 y 2016 en Cala Cativa han dado como resultado la realización de 2 modelos 3D del yacimiento (ver *Fig.- 19* y *Fig.- 20*). Para este estudio se ha utilizado principalmente el modelo obtenido en la campaña de 2016, ya que se excavó más exhaustivamente para poder acabar las secciones que no se pudieron realizar en 2015, y al mismo tiempo que se comprobó que estuvieran correctas las secciones ya realizadas.

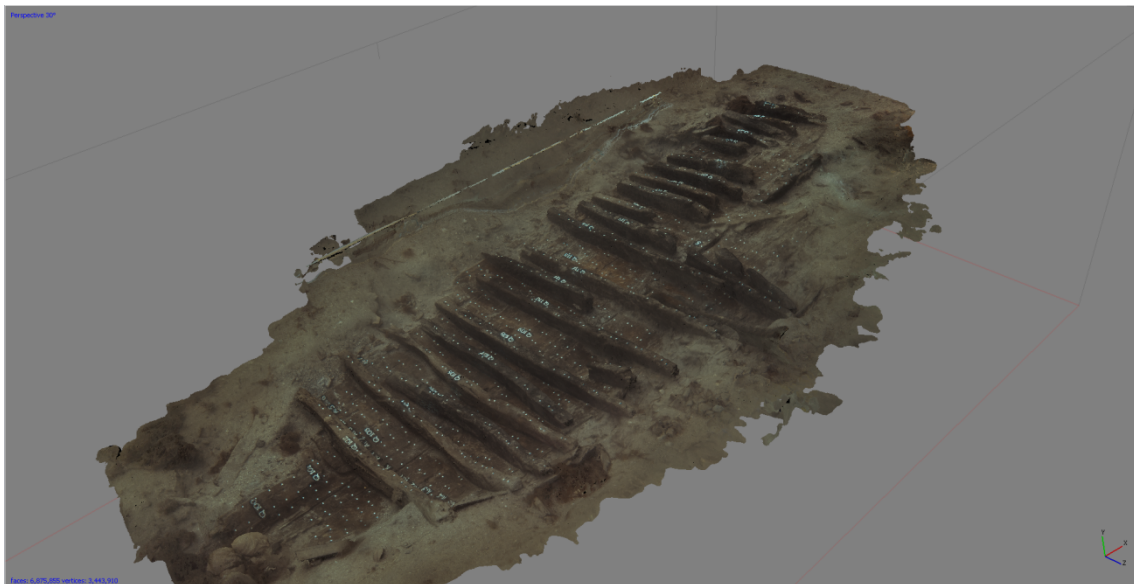


Fig.- 19 Modelo en 3D del yacimiento de Cala Cativa I de 2015. Fuente: elaboración propia.

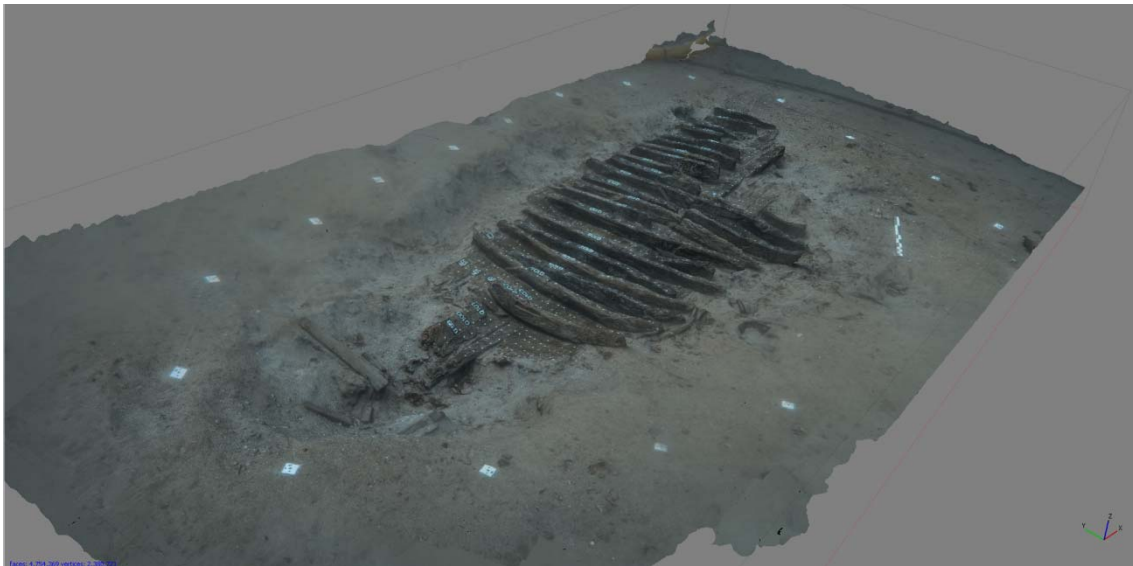


Fig.- 20 Modelo en 3D del yacimiento de Cala Cativa I de 2016. Fuente: elaboración propia.

Para ver el grado de precisión que podemos llegar a adquirir con un modelo generado por fotogrametría y el dibujo tradicional se ha procedido tanto a realizar una comparativa visual como métrica, para ver cuán diferentes, o no, pueden llegar a ser las dos técnicas de documentación.

En la comparativa visual, se han empleado los dibujos arqueológicos (realizados por la arqueóloga Rut Geli) de las secciones transversales del pecio (las cuadernas) y la longitudinal (la quilla) y posteriormente han sido digitalizados. Los dibujos se encuentran a escala 1:10 por lo que cuando queramos realizar pruebas métricas nos servirán para tomar medidas.

Los elementos de la arquitectura naval dibujados, como ya hemos mencionado son las cuadernas y la quilla, para el estudio de la comparativa visual hemos creído conveniente utilizar las cuadernas Q102 y Q108 (ver *Fig.- 21*). La primera de estas cuadernas presenta muescas realizadas en la parte superior central, esto nos hace suponer su función como carlinga, por lo que es en ese punto donde iría alojado el mástil de la embarcación. En el caso de la segunda cuaderna, ha sido seleccionada debido a su longitud, puesto que es la más larga de todas y se encuentra situada en la zona central del casco, lo que nos indica aproximadamente el ancho máximo del fondo del casco.

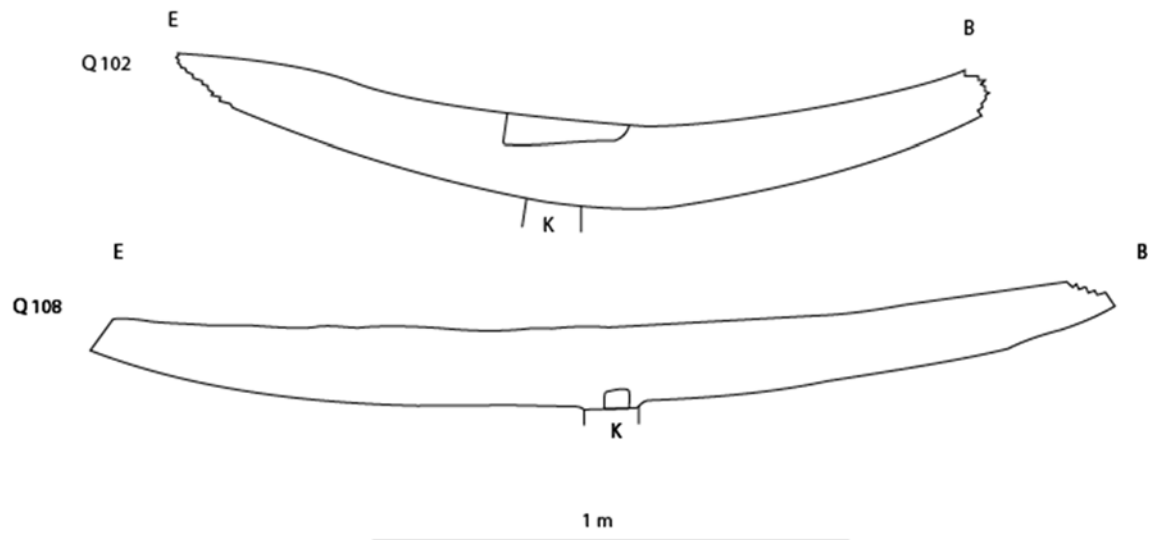


Fig.- 21 Digitalización de las cuadernas Q102 y Q108. Fuente: elaboración propia.

Para empezar, se procedió a una comparación entre las cuadernas obtenidas de la planimetría hecha por dibujo tradicional. El método que emplearemos en un primer momento será el de la superposición, como se muestra en la siguiente figura:

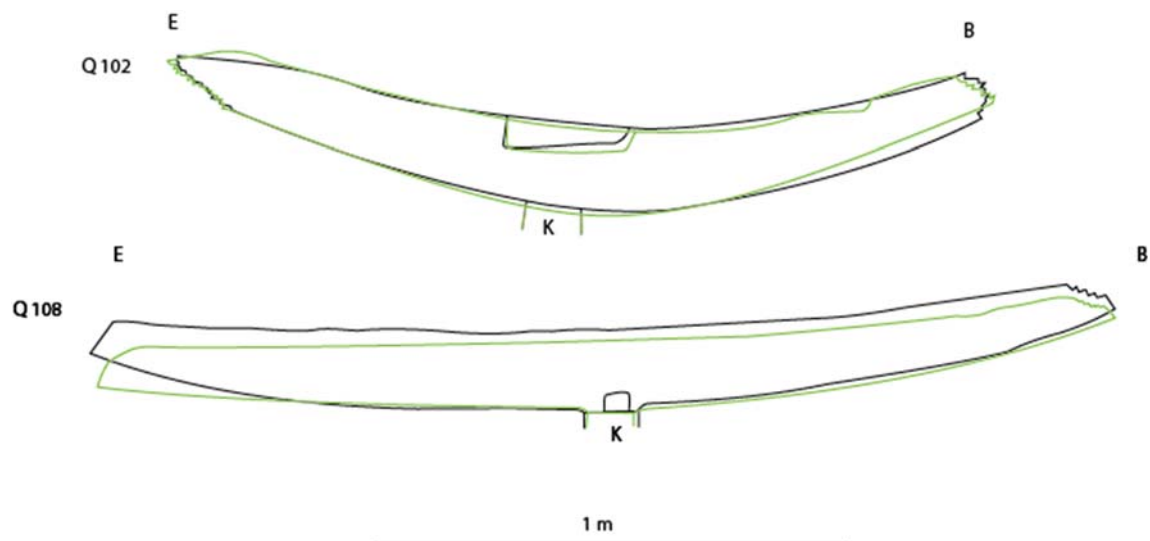


Fig.- 22 Superposición de la digitalización del dibujo tradicional (negro) con el obtenido de la fotogrametría (verde). Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar se aprecia un ajuste en ambas digitalizaciones, que, aun no siendo perfecto, es muy aproximado. En el caso de la cuaderna Q102 se puede cotejar que el patrón de ajuste entre ambos es significativo, diferenciándose únicamente en pequeñas zonas. Por otro lado, la cuaderna Q108 parece diferenciarse más a nivel de anchura, puesto que se observa una longitud muy similar en ambos casos. Estas pequeñas variaciones pueden deberse a múltiples factores, entre ellos el estado de visibilidad en el momento en que se realizaron las planimetrías *in situ*, como ya comentamos en el punto 3.2 de problemáticas asociadas al estudio de esta investigación.

En lo referente a la comparativa métrica se ha procedido a tomar distintas medidas de los dibujos de las secciones transversales y longitudinales de las cuadernas Q102, Q104, Q107, Q108, Q110 y la quilla, y las mismas medidas en la fotogrametría. Para el dibujo tradicional, al estar a escala 1:10, se han tomado las medidas con la herramienta de Medición que incorpora *Adobe Illustrator*, por ese motivo los valores aparecen con tres decimales. En el caso de la fotogrametría se han tomado las medidas directamente del modelo 3D y de la ortofoto, ya que estaban escalados, con la herramienta de Regla que incorpora *PhotoScan*, dando como resultado valores con dos decimales.

Una vez realizado todas las medidas, los valores se han plasmado en tablas, que corresponden a cada elemento analizado, donde aparte de las medidas también hay la diferencia entre la medida del dibujo, que tomamos como correcta, y la de la fotogrametría. Si el valor resultante es negativo quiere decir que la medida obtenida en la fotogrametría es menor a la del dibujo y si el valor de la diferencia es positivo, al contrario. Además, en la tabla se ha anotado el porcentaje de error que hay entre ambas mediciones.

A continuación, procedemos a mostrar las tablas asociadas a sus correspondientes cuadernas y la comparativa métrica realizada entre ambos métodos.

Sección trasversal: cuaderna Q102				
	cm en dibujo	cm en fotogrametría	Diferencia en cm.	% Error
largo	171,016	171	-0,016	0,009
alto babor	12,078	12	-0,078	0,646
alto centro	17,6	17,7	0,1	0,568
largo muesca	25,392	25	-0,392	1,544
alto muesca	6,413	6,35	-0,063	0,982
cabillas A-a'	3,993	3,79	-0,203	5,083
cabillas C-c'	4,064	4,06	-0,004	0,098
cabillas E-e'	3,061	3,062	0,001	0,032
cabillas F-f'	4,806	4,65	-0,156	3,246
cabillas e'-F	16,545	16,1	-0,445	2,689
ancho quilla	11,559	12,2	0.641	5,545

Tabla 3 Valores de la cuaderna Q102. Fuente: elaboración propia.

Sección transversal: cuaderna Q104				
	cm en dibujo	cm en fotogrametría	Diferencia en cm.	% Error
largo	194,557	193	-1,557	0,8
alto babor	8,441	8,29	-0,151	1,789
alto centro	14,066	13,1	-0,966	6,868
alto estribor	12,409	12,3	-0,109	0.878
ancho quilla	11,339	12	0,661	5,829
cabillas A-a'	5,104	5,1	-0,004	0,078
cabillas C-c'	3,09	3,17	0,08	2,589
cabillas E-e'	4,234	4,04	-0,194	4,581
cabillas G-g'	5,308	5,24	-0,068	1,281
cabillas H-h'	4,469	4,47	0,001	0,022
cabillas J-j'	3,54	3,58	0,04	1,13
cabillas L-l'	3,214	3,11	-0,104	3,236

Tabla 4 Valores de la cuaderna Q104. Fuente: elaboración propia.

Sección transversal: cuaderna Q107				
	cm en dibujo	cm en fotogrametría	Diferencia en cm.	% Error
largo	170,568	172	1,432	0,84
alto babor	11,865	10,5	-1,365	11,504
alto centro	14,982	13,5	-1,482	9,892
alto estribor	9,743	9,39	-0,353	3,623
ancho quilla	11,524	11,7	0,176	1,527
Ø cabilla B	1,9	1,85	-0,05	2,632
Ø cabilla F	2,1	2,12	0,02	0,952
cabillas A-a'	3,482	3,39	-0,092	2,642
cabillas C-c'	5,249	5,29	0,041	0,781
cabillas E-e'	4,296	4,29	-0,006	0,14
cabillas H-h'	4,533	4,56	0,027	0,595
cabillas J-j'	4,588	4,51	-0,078	1,7

Tabla 5 Valores de la cuaderna Q107. Fuente: elaboración propia.

Sección trasversal: cuaderna Q108				
	cm en dibujo	cm en fotogrametría	Diferencia en cm.	% Error
largo	215,194	215	-0,194	0,09
alto babor	9,289	9,23	-0,059	0,635
alto centro	16,187	15,1	-1,087	6,715
alto estribor	9,428	9,51	0,082	0,87
ancho quilla	11,026	11,6	0,574	5,206
cabillas A-a'	4,146	4,17	0,024	0,579
cabillas C-c'	3,792	3,75	-0,042	1,108
cabillas D-d'	4,014	4	-0,014	0,349
cabillas F-f'	4,33	4,39	0,06	1,386
cabillas H-h'	4,873	4,95	0,077	1,58
cabillas I-i'	4,191	4,11	-0,081	1,932

Tabla 6 Valores de la cuaderna Q108. Fuente: elaboración propia.

Sección trasversal: cuaderna Q110				
	cm en dibujo	cm en fotogrametría	Diferencia en cm.	% Error
largo	213,793	212	-1,793	0,839
alto babor	8,249	8,27	0,021	0,255
alto centro	14,491	14,3	-0,191	1,318
alto estribor	11,363	11,2	-0,163	1,434
ancho quilla	12,701	12,7	-0,001	0,008
cabillas C-c'	3,411	3,39	-0,021	0,616
cabillas E-e'	3,881	3,74	-0,141	3,633
cabillas G-g'	3,293	3,24	-0,053	1,609
cabillas H-h'	4,857	4,58	-0,277	5,703
cabillas J-j'	4,143	4,15	0,007	0,169
cabillas L-l'	4,201	4,24	0,039	0,928

Tabla 7 Valores de la cuaderna Q110. Fuente: elaboración propia.

Sección longitudinal: quilla				
	cm en dibujo	cm en fotogrametría	Diferencia en cm.	% Error
largo	646,642	644	-2,642	0,409
ancho Q102	14,817	13,5	-1,317	8,888
ancho Q104	8,819	9,27	0,451	5,114
ancho Q105	11,112	10,2	-0,912	8,207
ancho Q106	10,407	10,2	-0,207	1,989
ancho Q107	9,878	9,86	-0,018	0,182
ancho Q108	10,407	9,8	-0,607	5,833
ancho Q110	10,054	9,55	-0,504	5,013
ancho Q112	7,232	7,27	0,038	0,525
ancho Q114	8,29	8,23	-0,06	0,724

Tabla 8 Valores de la quilla. Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar en las tablas, la diferencia entre mediciones es mínima, con un porcentaje de error que en la mayoría de los casos no llega ni al 1%, pero se trata de elementos aislados, lo interesante sería ver si ambos métodos son comparables en todo el conjunto del yacimiento. Desde el punto de vista estadístico el estudio de la comparabilidad de los dos métodos de medición descritos no puede abordarse a partir de pruebas de comparación de medias ni a través del coeficiente de correlación lineal, puesto que pueden estimarse asociaciones falsamente excelentes. El abordaje de la concordancia, grado de acuerdo, entre ambos métodos debe realizarse a través de pruebas específicas como, el Coeficiente de Correlación Intraclass (CCI) y el diagrama de *Bland-Altman*¹⁸.

El CCI es una prueba que se utiliza para ver la equivalencia o la concordancia entre métodos de medición, de un mismo fenómeno, desde el punto de vista estadístico, el CCI es una forma adecuada para valorar la concordancia entre diferentes mediciones de una variable numérica. Dicho coeficiente estima el promedio de las correlaciones entre todas las posibles ordenaciones de los pares de observaciones disponibles.

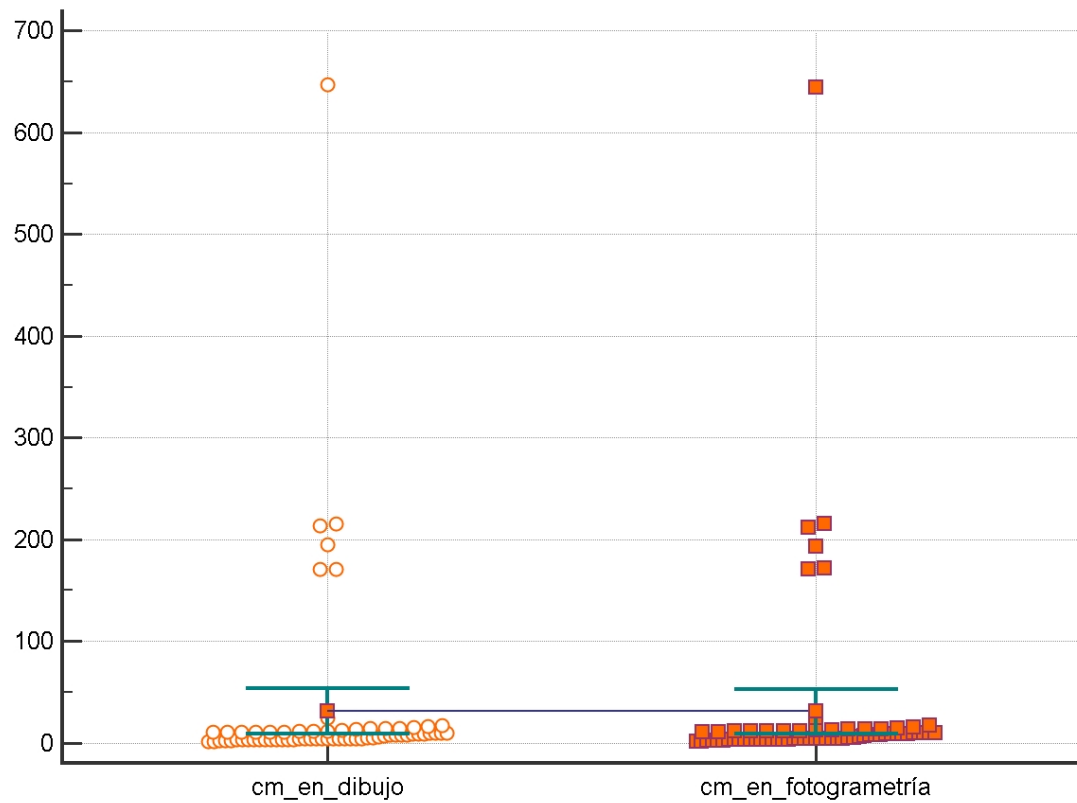
Los valores de concordancia dados por el CCI son como siguen: > 0.90 muy buenos, entre 0.90 y 0.71 buenos, entre 0.70 y 0.51 moderados, entre 0.5 y 0.31 mediocres y < 0.30 malos o nulos.

El análisis estadístico del CCI se realiza con los campos de la medición en el dibujo tradicional y la medición en la fotogrametría. El resultado es la siguiente tabla y gráfico:

Coeficiente de Correlación Intraclass (CCI)		
	Correlación Intraclass	Intervalo de confianza del 95%
Medidas individuales	1,0000	1,0000 a 1,0000
Medidas promedio	1,0000	1,0000 a 1,0000

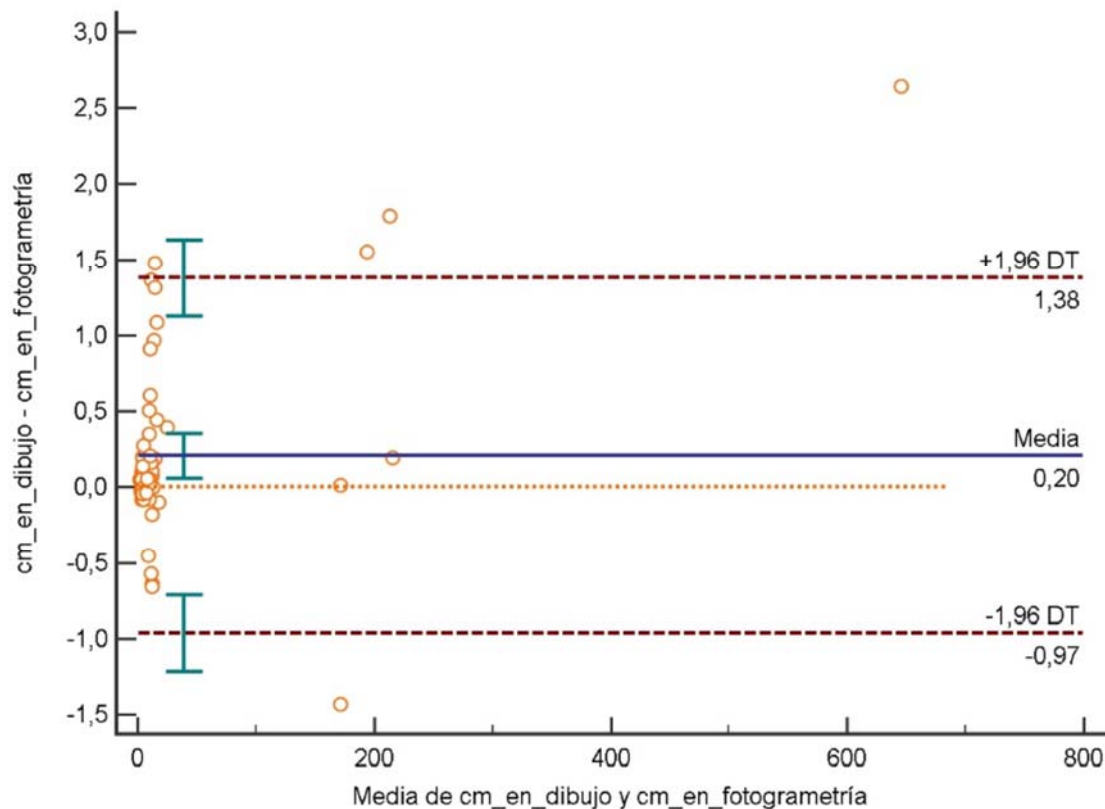
Tabla 9 Tabla de CCI de Cala Cativa I. Fuente: elaboración propia.

¹⁸Se utiliza el software de cálculos estadísticos: MedCalc para Windows, versión 17.9.7 (MedCalc Software, Ostend, Belgium).



Gráfica 1 Representación del CCI de Cala Cativa I. Fuente: elaboración propia.

El otro análisis que se utiliza es, como ya hemos mencionado, el diagrama de *Bland-Altman*, que representa gráficamente el valor de la media aritmética de las medidas del dibujo tradicional y la fotogrametría y el grado de relación que existe entre ellas con sus intervalos de confianza (ver *Gráfica 2*).



Gráfica 2 Diagrama de *Bland-Altman* de Cala Cativa I. Fuente: elaboración propia.

6.1.1. Análisis de los resultados

Una vez obtenidos los resultados procederemos a su análisis. En primera instancia, podemos apreciar que, en la comparativa visual de las digitalizaciones, existen algunas diferencias entre un método y el otro. En cambio, cuando comprobamos la diferencia entre las medidas obtenidas del dibujo tradicional y la fotogrametría, vemos que ésta es mínima, con un porcentaje de error muy bajo, hecho que contrasta con la comparativa visual.

Esta diferencia que observamos en la forma viene dada por una razón muy sencilla, la calidad a la que se han procesado las imágenes y generado los modelos 3D. Debido a que se ha trabajado con un ordenador portátil, que aun cumpliendo las especificaciones mínimas que recomiendan los creadores de *PhotoScan*, las posibilidades de generación de un modelo 3D se han visto mermadas.

Como se han tenido que procesar primero unas 164 fotografías (para 2015) y posteriormente 644 (para 2016), esto ha implicado que se tuviera que procesar en calidad media para minimizar el tiempo de procesado y poder de este modo generar los

2 modelos, ya que con cada lote de comandos para procesar las imágenes y generar el 3D, el ordenador queda bloqueado, trabajando exclusivamente en ello.

El resultado de esto es que las formas de los objetos no se definen tanto y queden redondeadas, dificultando así la interpretación de las líneas (ver *Fig.- 23*). Así pues, a mayor calidad, más definición tendrá el objeto.

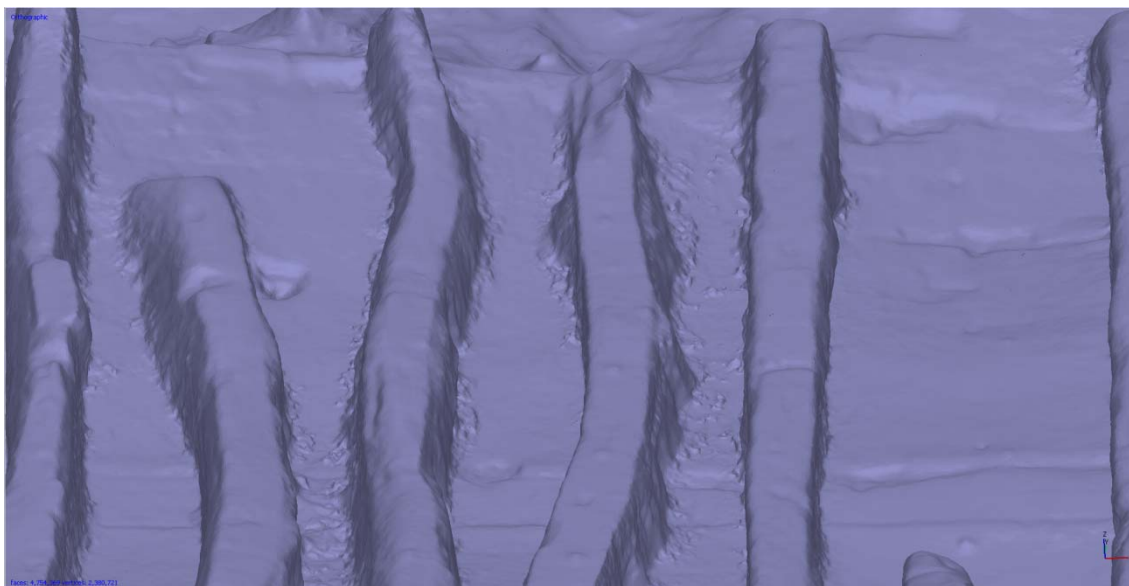


Fig.- 23 Detalle de formas poco definidas de las cuadernas de Cala Cativa I. Fuente: elaboración propia.

En lo referente a las mediciones, ya con las tablas podemos ver que la diferencia entre una técnica y la otra es mínima, sin existir prácticamente desviaciones. Aun así, para verificarlo hemos utilizado el Coeficiente de Correlación Intraclass (CCI) para ver el grado de concordancia/equivalencia entre los valores obtenidos mediante el dibujo y los obtenidos mediante fotogrametría (ver *Tabla 9* y *Gráfica 1*). Posteriormente también se ha usado el diagrama de *Bland-Altman* para visualizar la distribución de ambas mediciones dentro de los intervalos de confianza del 95% (ver *Gráfica 2*). Como se puede observar, el valor de concordancia es 1 (>0.90), lo que quiere decir que la concordancia entre ambos métodos de medición es muy buena, es decir que son equivalentes, tal como se puede observar en la distribución de las medidas de ambos métodos en el gráfico correspondiente.

El gráfico de *Bland-Altman* (ver *Gráfica 2*) representa gráficamente, en un diagrama de dispersión, la media de los dos métodos de determinación (*gold standart* y nuevo método) como mejor expresión del verdadero valor del parámetro medido frente a la diferencia absoluta de los dos métodos de medición. El gráfico incluye una línea horizontal que representa la media de las diferencias y otras dos paralelas a la misma que representa, los límites del IC del 95% de la media. La línea horizontal en el origen 0 representaría una concordancia absoluta entre el nuevo método y el *gold standar*. Las medidas realizadas mediante fotogrametría tienden a ser 0,2 cm mayores que en el

dibujo tradicional. Además, se puede observar gráficamente que el 95% de las medidas se encuentran dentro de los intervalos de confianza (-0,97 a +1,38).

6.2. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE DELTEBRE I

Con el modelo resultante del procesado de las imágenes del Deltebre I (ver Fig.- 24) hemos procedido de igual forma que en el caso de Cala Cativa I para ver el grado de precisión que existe entre ambas formas de proceder en la documentación: una comparativa visual y una métrica.

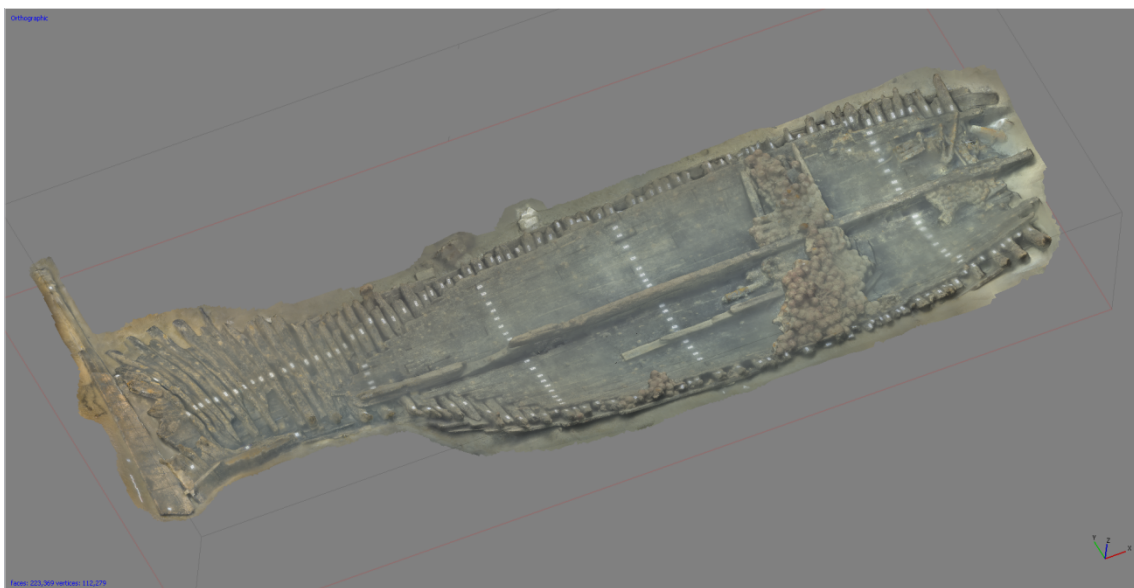


Fig.- 24 Modelo en 3D del yacimiento de Deltebre I. Fuente: elaboración propia.

Para la comparativa visual se ha creído oportuno tomar como referencia el timón del barco, puesto que es uno de los pocos que existen *in situ* y en tan buen estado de conservación. Además, tiene el valor añadido que solamente se excavó y documentó en 2009 y hasta la campaña de 2016 no se volvió a desenterrar ni documentar.

Para ello, se ha empleado el dibujo y digitalización que realizó la arqueóloga Rut Geli, arqueóloga del CASC (ver Fig.- 25 izquierda), comparándolo con el que hemos realizado nosotros digitalizando directamente sobre la ortofoto que se ha realizado con el programa *PhotoScan* (ver Fig.- 25 derecha).



Fig.- 25 Dibujo y digitalización del timón por Rut Geli (izqda.) y digitalización de la ortofoto (dcha.).

El resultado de la superposición de la digitalización de los timones que se puede observar en *Fig.- 26* nos muestra que hay una pequeña desviación entre ellos, aunque también es cierto que, a grandes rasgos, son muy similares tanto en longitudes como en la forma (a excepción de algunos elementos que se comentarán más adelante).

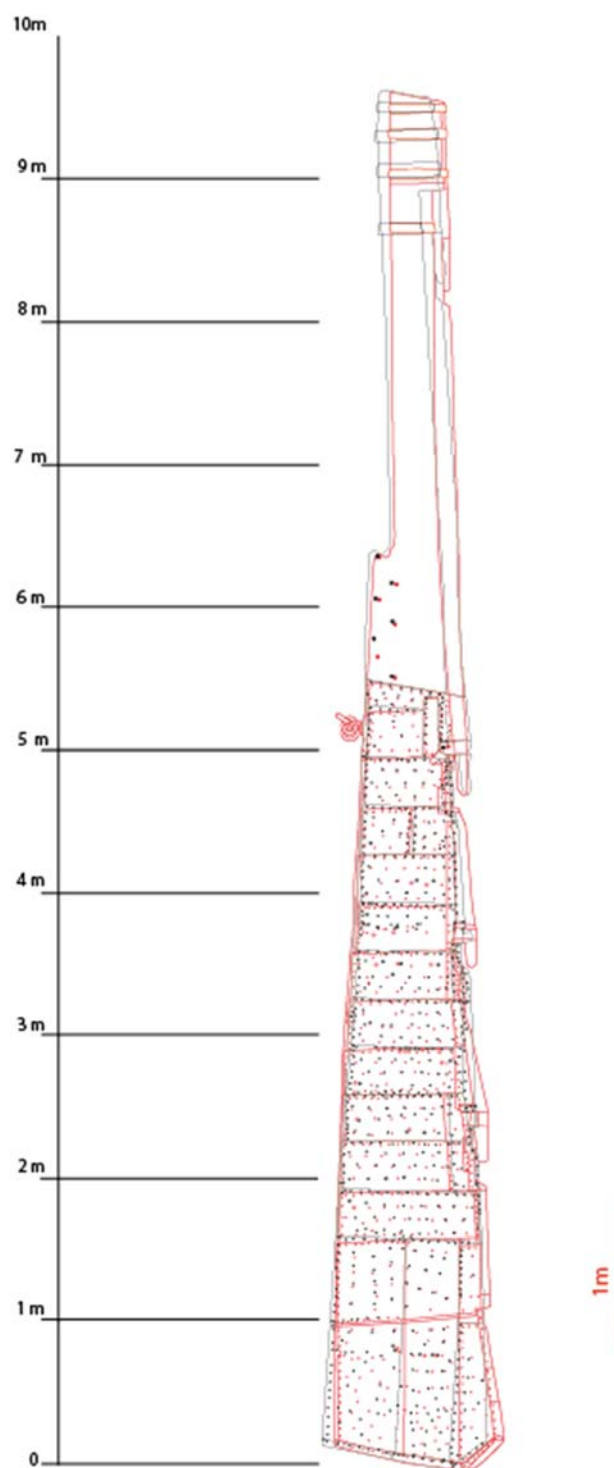


Fig.- 26 Superposición de la digitalización del dibujo tradicional (rojo) con el obtenido de la fotogrametría (negro). Fuente: elaboración propia basada en dibujo de Rut Geli (CASC).

De igual modo que en el Cala Cativa I, en este yacimiento también hemos elaborado unas tablas con distintas medidas para comprobar si hay mucha diferencia entre las medidas tomadas y el margen de error existente. En este caso, tenemos el aliciente que estamos hablando de los restos de un barco de grandes dimensiones, muchísimo más grande que el pecio romano de Cala Cativa, por lo que es interesante ver si para yacimientos de estas magnitudes se acumula mucho error.

Las tablas que se han creado son con medidas tomadas mediante las herramientas de medición de *Illustrator* y *PhotoScan* (del mismo modo que para Cala Cativa) en el timón y en la popa del barco. Los parámetros que se muestran son los mismo que las de Cala Cativa I, pero los elementos medidos son otros.

Planimetría: Timón				
	cm en dibujo	cm en fotogrametría	Diferencia en cm.	% Error
largo	974,142	962	-12,142	1,246
ancho caña	39,407	39,1	-0,307	0,779
ancho pala	118,839	112	-6,839	5,755
ancho medio	61,121	61	-0,121	0,198
largo forrado	560,743	556	-4,743	0,846
largo madera	425,224	418	-7,224	1,699
largo 1º cintón	40,673	36,8	-3,873	9,522
ancho 1º cintón	6,512	6,5	-0,012	0,184
largo 2º cintón	40,841	41,8	0,959	2,348
ancho 2º cintón	6,429	5,57	-0,859	13,361
largo 3º cintón	41,52	41,4	-0,12	0,289
ancho 3º cintón	7,187	8,44	1,253	17,434
largo 4º cintón	31,541	29,4	-2,141	6,787
ancho 4º cintón	6,596	6,32	-0,276	4,184

Tabla 10 Valores del timón. Fuente: elaboración propia.

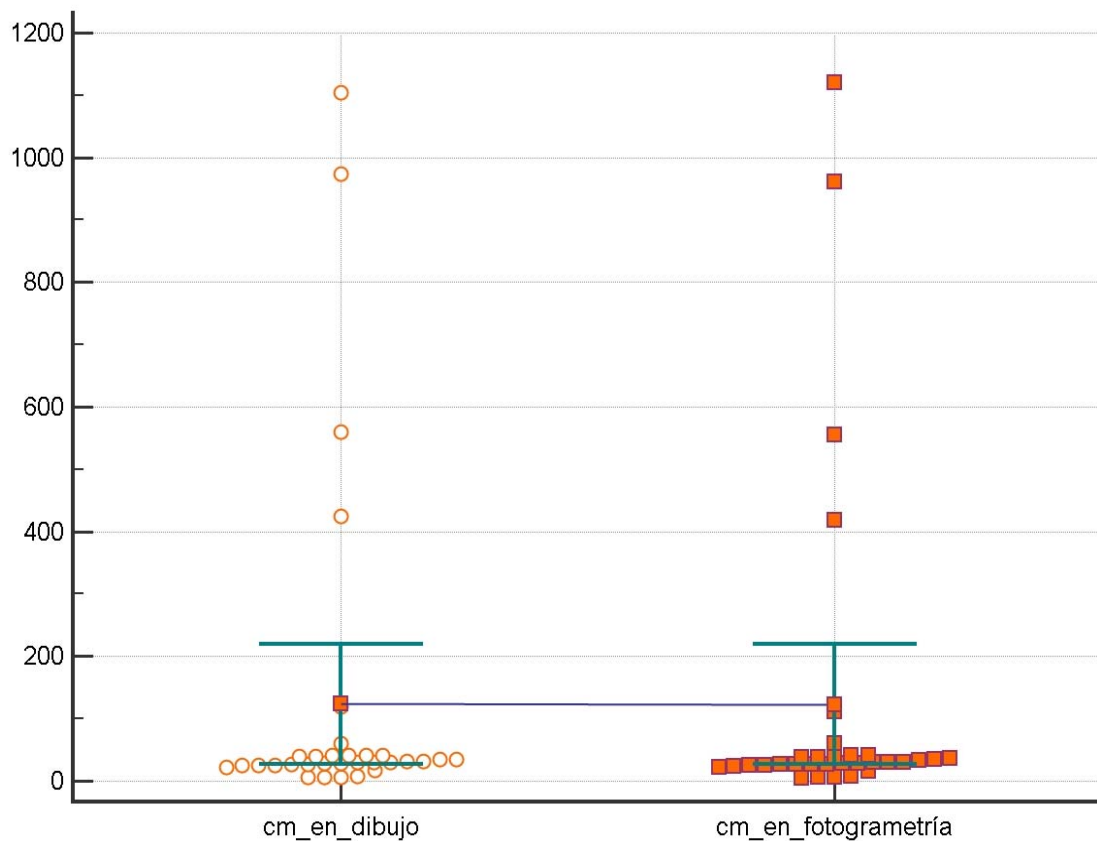
Planimetría: Popa (2009,2011 y 2012)				
	cm en dibujo	cm en fotogrametría	Diferencia en cm.	% Error
codaste-Q33B	1104,243	1120	15,757	1,427
ancho Q10B	31,214	31	-0,214	0,686
ancho Q11B	16,921	16,5	-0,421	2,488
ancho Q12B	28,51	27,5	-1,01	3,543
ancho Q13B	30,623	30,5	-0,123	0,402
ancho Q14B	30,695	30,1	-0,595	1,938
ancho Q15B	35,688	35	-0,688	1,928
ancho Q16B	28,962	28,5	-0,462	1,595
ancho Q17B	26,496	26,9	0,404	1,525
ancho Q18B	22,814	22,3	-0,514	2,253
ancho Q19B	25,561	25,8	0,239	0,935
ancho Q20B	25,497	25,8	0,303	1,188
ancho Q21B	24,764	24	-0,764	3,085
ancho Q22B	26,821	26,3	-0,521	1,943
ancho Q23B	29,608	26,5	-3,108	10,497
ancho Q24B	35,58	32,7	-2,88	8,094
ancho Q25B	41,108	38,6	-2,508	6,101
ancho Q26B	39,964	38,1	-1,864	4,664

Tabla 11 Valores de la zona de la popa del barco. Fuente: elaboración propia.

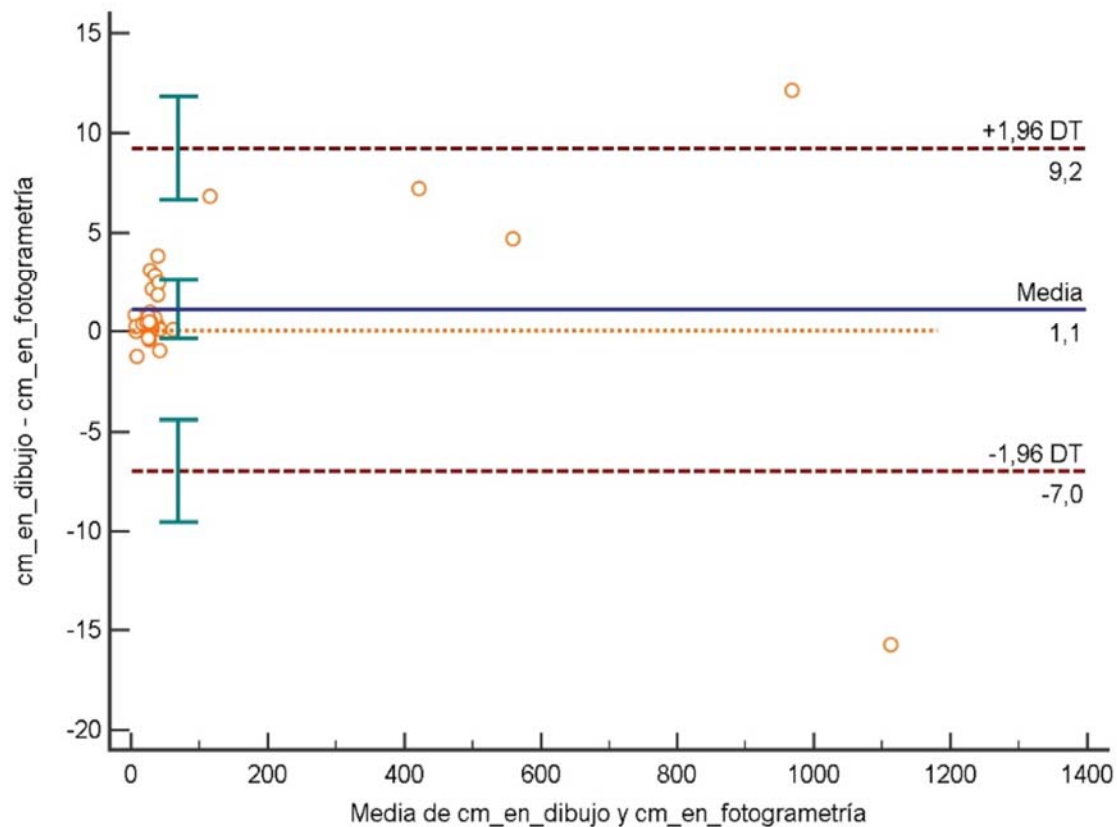
Del mismo modo que en el otro yacimiento, en este también hemos realizado el Coeficiente de Correlación Intraclass (CCI) y el diagrama de *Bland-Altman*, como mostramos en la tabla (12) y gráficos (3 y 4) expuestos a continuación:

Coeficiente de Correlación Intraclass (CCI)		
	Correlación Intraclass	Intervalo de confianza del 95%
Medidas individuales	0,9999	0,9997 a 0,9999
Medidas promedio	0,9999	0,9999 a 1,0000

Tabla 12 Tabla de CCI de Deltebre I. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 3 Representación del CCI de Deltebre I. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 4 Diagrama de *Bland-Altman* de Deltebre I. Fuente: elaboración propia.

6.2.1. Análisis de los resultados

Con los resultados obtenidos, podemos ver, como ya hemos apuntado antes, que uno de los dos timones tiene una ligera inclinación. Esto se puede deber a la fotogrametría, al dibujo tradicional o a ambas.

Hemos de remarcar que el dibujo del timón se realizó con una visibilidad de 20 cm e incluso a veces solamente palpando debido a la nula visibilidad que había. Para ello se usó una escuadra y se tendió una cinta métrica de una punta a otra del timón, sujeta en ciertos puntos con plomos para evitar que la corriente deformara lo mínimo la cinta produciendo así un error en la toma de datos.

Respecto a la fotogrametría, aunque se dio una mayor visibilidad (entre 1 y 7 metros), que con respecto a cuándo se realizó la documentación tradicional, hubo una gran presencia de partículas en suspensión en el agua. Este hecho supuso que no se pudieran tomar unas fotografías del todo nítidas¹⁹, y llevo a realizar un total de 6126

¹⁹ Para ver un ejemplo de una fotografía poco nítida y la misma una vez aplicado el filtro para que el programa la reconozca a al procesarla, ver anexo.

fotografías para cubrir todo el yacimiento con el mayor detalle posible²⁰. Esta ingente cantidad de fotografías hizo que la única forma de poder procesarlas fuera en calidad baja, ya que tanto en calidad media y alta requería que el ordenador estuviera trabajando sin parar entre 1200 y 1300 horas ininterrumpidamente sólo para realizar el primer paso, el de orientar las fotos y generar la nube dispersa de puntos. Con el equipo informático del que disponíamos fue completamente inviable realizar una nube densa de puntos para poder obtener un modelo con mayor nivel de detalle. Este hecho, aun siendo los resultados bastante buenos, pueden haber hecho que exista cierta distorsión/desviación al generar el modelo.

Aun así, vemos según las tablas que, aunque parezca que hay más diferencia entre las medidas y más error que en Cala Cativa I, hemos de tener presente que las dimensiones son hasta 5 veces mayores en Deltebre I que en Cala Cativa I. Aunque no podemos asegurarlo de forma rotunda, esto puede indicar que a mayor envergadura del pecio mayor puede ser el error contemplado. No obstante, se debe tener en cuenta también el factor de conservación, ya que el derrelicto ha sufrido un deterioro marcado durante estos años, con lo cual la estimación métrica podría verse afectada.

De todas formas, al realizar los análisis estadísticos como se puede ver en la tabla resultante del CCI, el valor de concordancia es 0,9999 (>0.90), lo que quiere decir que la concordancia entre ambos métodos de medición es muy buena, es decir que son equivalentes, tal como se puede observar en la distribución de las medidas de ambos métodos en el gráfico correspondiente.

Al igual que ocurría en el gráfico del CCI de Cala Cativa I, las mediciones de ambos métodos están agrupadas en torno a la línea del 0, los intervalos de confianza de ambas mediciones son las líneas verdes, que agrupan al 95% de todas las muestras, y el 5% de las muestras de cada medición fuera de los intervalos de confianza del 95%.

En el diagrama de *Bland-Altman* (ver *Gráfica 4*), podemos observar que la diferencia entre las medias aritméticas del dibujo tradicional y de la fotogrametría es de 1,1 cm, es decir las medidas realizadas mediante fotogrametría tienden a ser 1,1 cm mayores que en el dibujo tradicional. Se puede observar gráficamente también que el 95% de las medidas se encuentran dentro de los intervalos de confianza (-7 a +9,2).

²⁰ La cobertura se realizó en 4 partes en 4 días distintos. Para las tres primeras partes sólo hicieron falta unas 3000 fotos para cubrir la mayoría del barco debido a la buena visibilidad (entre 3-7m). En cambio, para la última parte (timón y parte de la popa) debido a que solamente había 1m de visibilidad se tuvieron que hacer otras 3000 fotos para cubrir lo que quedaba.

VII. PERSPECTIVAS DE FUTURO

Llegados a este punto de nuestra investigación, surge la necesidad en un primer momento, a nivel particular, de valorar los caminos que podría tomar esta investigación.

A la vista de los resultados, estos han sido positivos y han demostrado la concordancia entre ambos métodos y un bajo margen de error. En este punto debemos plantearnos la necesidad de realizar más estudios. En un primer momento sería interesante poder realizar nuevas pruebas en los yacimientos de Deltebre I y Cala Cativa I. Sería ideal poder emplear en la documentación diferentes cámaras, con el objetivo de comprobar si el resultado de concordancia entre ambos métodos se vería afectado según se emplee una u otra equipación fotográfica. De igual modo, el empleo de un equipo más potente para la creación de ortofotos con una calidad superior a las empleadas podría quizás darnos unos resultados diferentes a los actuales. El objetivo sería poder precisar mejor las formas tanto de las cuadernas como del timón, y ver si es posible reducir aún más el margen de error entre ambos métodos de documentación.

Son posibilidades que se deben barajar, con el objetivo de crear un registro digital completo de ambos yacimientos. Quizá el principal escollo es que los yacimientos se ven sometidos a un estrés ambiental y biológico con el paso del tiempo. Procesos como la erosión, el calentamiento global, actividades pesqueras y el saqueo por parte de caza tesoros, acaban destruyendo el patrimonio de forma acelerada. Esto nos podría suponer un problema e impedir hacer pruebas de medición entre las planimetrías, ya generadas, y el propio pecio si ha transcurrido mucho tiempo entre el dibujo de las mismas y la toma fotogramétrica. Por otro lado, quizás se podría utilizar el método fotogramétrico, ya que es un reflejo más fidedigno de la realidad, de esta degradación en los pecios. Quizá sería un buen modo de registro, con el que poder hacer un control y seguimiento del yacimiento mediante fotogrametrías periódicas.

Es valorable la extrapolación de este estudio a otros yacimientos, con el objetivo de poner a prueba el método en más yacimientos, y con ello comprobar la exactitud en las formas y la precisión en las medidas. En vista de las posibilidades que ofrece el método fotogramétrico, pese a sus limitaciones, y su auge en el ámbito de la arqueología subacuática, sería interesante poder elaborar unas pautas o protocolos de actuación en caso de querer realizar este tipo de documentación digital. El objetivo sería poder establecer las mismas como un protocolo estándar, y con ello incentivar y facilitar el proceso de introducción a la técnica fotogramétrica al resto de investigadores.

A lo largo de esta investigación se ha ido perfilando este posible protocolo de actuación, sobre todo en el apartado V, en el cual se desarrollaba el proceso de realización de una cobertura fotogramétrica. A continuación, aunque a modo de

resumen, procederemos a exponer los pasos básicos a tener en cuenta a la hora de realizar la fotogrametría de un yacimiento subacuático:

- Disponer del equipo necesario, es decir, de una cámara que guarde en formato JPEG y RAW, y un equipo informático que se ajuste a los requisitos del software que vayamos a emplear.
- Usar una tarjeta de memoria que tenga una velocidad de grabado rápido para no perder tiempo entre las tomas fotográficas.
- Etiquetar y marcar todos los elementos de la arquitectura naval (en caso de que se conserve madera).
- Si se trata de un yacimiento muy grande, dividirlo en tramos/secciones, limpiar cada tramo de forma eficiente, además de la parte adyacente, para que cuando se genere el 3D las secciones puedan encajar entre ellas unificándose y mostrándonos una visión completa del yacimiento.
- Antes o después de la cobertura fotográfica emplear una tabla de colores para corregir y normalizar la tonalidad de las fotografías posteriormente en el laboratorio.
- Realizar, por norma general, una cobertura, como si se tratara de un objeto aislado más una cobertura aérea, realizando una especie de cúpula.
- Y, por último, asegurarnos de que se ha realizado de forma paralela una documentación tradicional del yacimiento. Esta es útil para documentar determinados elementos y tomar medidas para poder escalar en laboratorio, y evidentemente es necesaria por si el modelo fotogramétrico que generamos fallase o no fuese de mucha calidad.

La importancia de la obtención de modelos tridimensionales y ortoimágenes, radica en la necesidad de una visión en extensión de los yacimientos a un *click* desde cualquier ordenador. Esto conlleva una gran ventaja en el estudio de estructuras navales y procesos de post-documentación, puesto que la generación de imágenes completas de los pecios facilita en gran medida el poder analizar los derrelictos sin limitaciones de tiempo, y, por lo tanto, hacer un adecuado registro en conjunto de la estructura general.

A nivel académico la fotogrametría es un buen modo de divulgar datos, fáciles de compartir y procesar, e incluso pueden estar disponibles para el ámbito no-académico por medio de internet, lo cual supone un gran avance a nivel de divulgación, ya que se da acceso a ese material no sólo a expertos en nuestro campo, sino también a colegios e instituciones ajenas al círculo universitario y al común poblacional. Si bien es cierto que el desarrollo de este tipo de tecnologías ha sido lento, en los últimos años se está produciendo una aceleración y este avance tecnológico hace cambiar el modo en que los arqueólogos trabajan. La eficiencia que implica el uso de nuevas tecnologías incide directamente en la rapidez, el tratamiento y la publicación de datos, provocando que estas sean muchísimo más rápidas.

Actualmente se está empezando a incluir el uso de vehículos operados a distancia, los denominados ROV (*Remote Operated Vehicle*), en algunas intervenciones arqueológicas de este tipo, esto facilita en gran medida el trabajo de documentación, puesto que, en cierto modo se despeja la problemática de la profundidad (pueden alcanzar más de 300 metros) y tiempo de inmersión. Debemos tener en cuenta que en ocasiones los naufragios hallados en alta mar son de difícil acceso para los buceadores debido a la profundidad en la que se encuentran. De esta forma, se consigue también la protección del pecio, cumpliendo así la Norma 1 de la convención de la UNESCO de 2001 (Maarleveld *et al.*, 2013) ya que, se puede saber el estado de conservación del pecio sin intervenir en él, así como su deterioro a lo largo del tiempo como es el caso del pecio de la Primera Guerra Mundial, el Danton (Jordan y Dumas, 2009).

No obstante, actualmente este tipo de vehículos submarinos presentan una serie de inconvenientes a tener en cuenta: el principal es su costo y la cantidad de energía que se necesita para hacerlo operativo. Durante los años ochenta aparecieron los denominados *Low Cost ROV* (LCROV), estos nuevos dispositivos son más ligeros (10-15 kg) y de un costo menor, a pesar de ello, siguen suponiendo una considerable inversión. Si bien es cierto que estos ROV son un avance importante en la exploración submarina, también son aparatos que suponen un coste prohibitivo para las instituciones académicas.

Es posible que en un futuro la técnica fotogramétrica sea algo común y extendida, pero aún queda un largo camino por recorrer, puesto que la mayoría de los modelos obtenidos mediante fotogrametría no son perfectos y pueden tener diferentes márgenes de error. En ningún caso debemos confiar ciegamente en los resultados obtenidos mediante fotogrametría, estos deben ser verificados, hasta que se demuestre su fiabilidad de forma contrastada y con datos empíricos, mediante la realización de estudios sistemáticos sobre otros yacimientos.

VIII. CONCLUSIONES

Una vez realizadas las comparativas analíticas de cada pecio, entre sus respectivas planimetrías en dibujo tradicional y mediante fotogrametría digital, podemos proceder a las conclusiones finales.

Se han realizado todas las comparaciones planteadas en nuestros objetivos, y como resultado podemos afirmar que ambos métodos, tanto el dibujo tradicional como el fotogramétrico, nos arrojan datos que demuestran que ambos son equivalentes.

Con respecto al primer objetivo hemos planteado un proceso de estudio que permite comparar dos técnicas de documentación diversas, la documentación por dibujo subacuático y la fotogrametría, cada una con sus ventajas y desventajas, pero que como se puede observar ofrecen resultados fiables dentro de las posibilidades de cada método. El estudio que hemos realizado permite visualizar de forma clara la superposición mediante la digitalización y preparación de los registros documentales para un análisis posterior, salvando los problemas lógicos derivados del uso de técnicas de documentación distintas.

Los resultados obtenidos mediante la comparación visual por superposición nos muestran un cotejo en el que, en algunos casos, se aprecia una similitud evidente entre ambos métodos. Tanto en Deltebre I como en Cala Cativa I nos evidencian una gran similitud entre las planimetrías tradicionales y el dibujo realizado sobre fotogrametría digital. Quizá los casos más destacables en el análisis de superposición sean los de la cuaderna Q102 (ver *Fig.- 21*) de Cala Cativa I, y la superposición del timón de Deltebre I (ver *Fig.- 26*), es donde se aprecia un ajuste y semejanza más cercana entre ambos métodos. No obstante, este es un simple cotejo visual y complementario a nuestro estudio, por ello no debemos centrar nuestro análisis final en estos resultados.

Esto nos lleva al objetivo número 2 planteado en esta investigación. Como se puede observar en el apartado VI, no sólo hemos procedido a este análisis visual que comentábamos, sino que también se han aplicado métodos de medición métrica para posteriormente realizar un análisis estadístico. Una vez obtenidas las medidas de las planimetrías de ambos pecios se procedió a calcular el Coeficiente de Correlación Intraclass (CCI) mediante el paquete estadístico *MedCalc*, para ambos derrelictos de forma independiente. Los resultados que nos arrojan estos análisis son cuanto menos interesantes, el CCI mostraba un valor de concordancia de 1,0000 (>0.90) para Cala Cativa I y de 0,9999 (>0.90) para Deltebre I, mostrando la equivalencia entre métodos. El diagrama de *Bland-Altman*, tanto en el caso de Deltebre I como Cala Cativa I (Gráficas, 1, 2, 3 y 4), muestra como las mediciones tomadas entre ambos métodos están dentro del intervalo de confianza del 95%.

Si bien los resultados de este estudio son novedosos, y nos indican una línea de investigación por explotar, queda todavía mucho por hacer en el campo de la fotogrametría arqueológica. De igual modo, resulta interesante la posibilidad de introducir la aplicación de técnicas estadísticas y análisis espaciales en estos estudios para poder llegar a conclusiones más elaboradas sobre la distorsión en el registro arqueológico. Quedará, por tanto, para futuros trabajos el plantear acercamientos estadísticos y de análisis espacial que complementen los aquí presentados.

Por último, con respecto al objetivo 3, tras la conclusión de los análisis comparativos tanto visuales como métricos, nos conducen al apartado VII, en el cual, en base a los resultados de la investigación se ha hecho una valoración sobre las perspectivas de futuro de este estudio, y de la fotogrametría digital como disciplina documental en el ámbito de la arqueología subacuática. Posteriormente, se ha valorado la necesidad de establecer unas pautas de actuación a nivel de campo, tanto para la documentación fotogramétrica como para la estrategia a seguir en la toma de datos. El objetivo es poder ayudar a plantear a futuros investigadores una estrategia adecuada para la documentación arqueológica, con garantías y un protocolo predeterminado.

A la luz de estos resultados es evidente la utilidad del proceso de fotogrametría digital como método complementario para la labor documental en el entorno subacuático, puesto que como hemos dicho de forma reiterada anteriormente, contamos con limitaciones tanto ambientales como temporales en los procesos de excavación subacuática. El grado de confianza y similitud entre las técnicas planteadas es alto, y los resultados nos indican una línea de estudio interesante, pero aun hoy día queda mucho por hacer y es necesario la realización de más investigaciones que ayuden a desarrollar y corroborar las cuestiones aquí planteadas.

Por todo ello, es evidente que la aplicación de esta metodología de forma generalizada, ya no sólo a nivel subacuático, supondría un paso importante, pero siempre como método complementario al dibujo tradicional. No resulta recomendable desterrar el modelo tradicional y centrarse en el uso de técnicas fotogramétricas únicamente, puesto que aún hoy día necesitan de más estudio en cuanto a sus aplicaciones y utilidad.

A pesar de ello, es cierto que el uso de la fotogrametría ha posibilitado aligerar en gran medida la carga documental de las investigaciones subacuáticas, dotando al investigador de posibilidades que no te permite el dibujo tradicional, como el hecho de poder observar el propio yacimiento en formato 3D y en extensión desde la comodidad de un ordenador. De igual modo la posibilidad de crear planimetrías a partir de ortofotos supone un complemento interesante debido al mayor nivel de detalle y realismo aportado por esta técnica.

Como hemos señalado a lo largo de este trabajo, actualmente las herramientas para generar modelos 3D a partir de la fotogrametría están al alcance de todos y ya no se requieren grandes sumas de dinero ni de conocimientos avanzados en informática para poder hacer uso de ellos. A grandes rasgos, simplemente hace falta un equipo adecuado de cámara, ordenador y el *software* específico.

En cierto modo quizás la única limitación en el ámbito fotogramétrico reside en la potencia de los equipos que empleemos, las cuales nos dictarán la calidad de nuestros modelos fotogramétricos y el tiempo que debemos invertir en el proceso de generación del mismo. El problema radica en el sistema informático con el que trabajaremos y ejecutará el programa fotogramétrico para generar nuestra ortofoto. Se requieren unos requisitos mínimos, los cuales son exigidos por el fabricante del software para hacer funcionar el mismo. Si se cumple con estos mínimos exigidos en principio se podrá realizar pequeños trabajos fotogramétricos, pero sin grandes pretensiones, lo que a corto plazo y si necesitamos de mayor calidad en nuestras ortofotos este equipo informático será insuficiente.

Por tanto, es recomendable que antes de lanzarse al ámbito de la fotogrametría digital se lleve a cabo una valoración de la inversión inicial que se quiere hacer en el equipo informático y si esta le compensa a largo plazo, ya que así evitamos el tener que hacer dos compras sucesivas. La adquisición de un equipo potente puede suponer un desembolso importante, no obstante, hacernos con un equipo que pueda trabajar con el software sin problemas y generar fotogrametrías de buena calidad, a la larga significa una compensación del gasto y también una prolongación de la vida útil y productiva del mismo.

Debemos también tener presente que a la hora de generar planimetrías deberíamos alcanzar un estándar de calidad que sea asumible para todos, es decir, no todo el mundo dispondrá de un ordenador con las mismas características que el nuestro. Por esta razón tendremos que tener en cuenta que en ocasiones será necesario reducir la calidad de nuestros trabajos, para facilitar de este modo que otros usuarios o investigadores puedan visualizarlos o trabajar con ellos.

Como hemos observado en la comparativa de las formas de ambos derrelictos realizadas en el primer objetivo de nuestra investigación, éstas distan más o menos del dibujo realizado por el arqueólogo en el yacimiento. Este hecho se podría deber también al equipo informático con el que durante nuestra investigación se ha llevado a cabo el trabajado fotogramétrico, así que se debería valorar si la exactitud en el dibujo a partir de ortofotos viene dada por la calidad de la misma y si esta aumentaría su precisión con una mejor calidad en el procesado.

Como camino de futuro sería necesario la generación de más estudios enfocados en corroborar esta precisión existente, o no, en el uso de la fotogrametría. Como bien

señala Yamafune *et al.* (2016, p. 723): “Digital-borne data is not error-free and must be analyzed and interpreted with the same scientific principles as the conventional ‘pen and paper’ work.”. Por lo que, aunque se demuestre que la técnica es fiable siempre se deberían realizar comprobaciones *in situ* si es posible, por un ojo experto y entrenado, para rectificar errores y comprobar que no se haya pasado algo por alto o que haya pasado desapercibido para la cámara.

La fotogrametría es una técnica aún incipiente, de la cual quedan puntos por depurar. La arquitectura naval es una de las asignaturas pendientes en este campo, el uso de estas ortofotos para el estudio de pecios es una herramienta de valor incalculable, ya que posibilita el análisis de los pecios fuera del medio acuático mediante levantamientos 3D, y de igual modo simplifica el trabajo a los investigadores. Es posible que esta dinámica en la falta de publicaciones encaradas a estudios fotogramétricos como el presente se vea corregida con el paso de los años. Las generaciones venideras de investigadores en el campo arqueológico apuestan por el uso de este tipo de técnicas, y su inmersión en el entorno tecnológico y digital es mucho más fuerte que en épocas anteriores. La arqueología es una ciencia viva e interdisciplinaria, y como tal debemos explotar toda su potencialidad en busca del pasado humano.

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.- 1 Casa del <i>Balcone Pensile</i> , en Pompeya s. XIX. Fuente: fondo documental de la <i>Bibliothèque numérique patrimoniale du Service Commun de l'Université de Strasbourg</i>	13
Fig.- 2 Pompeya s. XIX, fotografía del cuerpo de un infante conservado por la acción de las cenizas volcánicas. Fuente: fondo documental de la <i>Bibliothèque numérique patrimoniale du Service Commun de l'Université de Strasbourg</i>	14
Fig.- 3 Catedral de Wetzlar fotografiada por Meydenbauer en 1858, extraída de Albertz (2001, p.7, Fig. 2)	15
Fig.- 4 Primera cámara fotogramétrica creada por Meydenbauer, extraída de Albertz (2001, p.7, Fig. 3)	16
Fig.- 5 Ejemplo gráfico de la visión estereoscópica, extraída de Van Damme (2015, p.7, Fig. 4)	18
Fig.- 6 Gráfico pérdida de color, extraído de Van Damme (2015, p.19, Fig. 14)	44
Fig.- 7 Diferentes fotos del tablero en varios ángulos y distancias. Fuente: CASC	48
Fig.- 8 Detalle de la distorsión que se produce al tomar fotos bajo el agua con la cámara Olympus E-M5 y su carcasa. Fuente: CASC	49
Fig.- 9 Cobertura teórica de un objeto aislado, extraído del manual de <i>Agisoft PhotoScan 1.3</i> (2016, p.9).....	50
Fig.- 10 Ejemplo de cobertura del pecio Cala Cativa I. Fuente: elaboración propia	50
Fig.- 11 Tabla de color <i>Spydercheckr</i> de 24 colores, de la casa Datacolor. Fuente: elaboración propia.....	52
Fig.- 12 La misma tabla de color, una bajo el agua (Izda.) y la misma pero habiendo normalizado el color (Dcha.). Fuente: elaboración propia	53
Fig.- 13 Tabla <i>SpyderCheckr</i> de 48 colores. Fuente: elaboración propia basada en Manual <i>SpyderCheckr</i>	57
Fig.- 14 Tabla de valores RGB (3 últimas columnas) de <i>SpyderCheckr</i> de 48 colores (para ver la tabla entera ver anexos). Fuente: elaboración propia basada en Manual <i>SpyderCheckr</i>	58
Fig.- 15 Ejemplo de nube dispersa del yacimiento Cala Cativa I con 163.671 puntos. Fuente: elaboración propia.....	59

Fig.- 16 Ejemplo de nube densa del yacimiento de Cala Cativa I con 23.77.662 puntos. Fuente: elaboración propia.....	60
Fig.- 17 Ejemplo de malla generada con nube densa de puntos. Fuente: elaboración propia	60
Fig.- 18 Colocación de los marcadores en el jalón y asignación del valor entre los dos puntos (valor del tercer recuadro de la izquierda). Fuente: elaboración propia.....	61
Fig.- 19 Modelo en 3D del yacimiento de Cala Cativa I de 2015. Fuente: elaboración propia	62
Fig.- 20 Modelo en 3D del yacimiento de Cala Cativa I de 2016. Fuente: elaboración propia	63
Fig.- 21 Digitalización de las cuadernas Q102 y Q108. Fuente: elaboración propia	64
Fig.- 22 Superposición de la digitalización del dibujo tradicional (negro) con el obtenido de la fotogrametría (verde). Fuente: elaboración propia.....	64
Fig.- 23 Detalle de formas poco definidas de las cuadernas de Cala Cativa I. Fuente: elaboración propia.....	71
Fig.- 24 Modelo en 3D del yacimiento de Deltebre I. Fuente: elaboración propia.....	72
Fig.- 25 Dibujo y digitalización del timón por Rut Geli (Izqda.) y digitalización de la ortofoto (Dcha.)	73
Fig.- 26 Superposición de la digitalización del dibujo tradicional (rojo) con el obtenido de la fotogrametría (negro). Fuente: elaboración propia basada en dibujo de Rut Geli (CASC)	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Memoria que se necesita para orientar las fotografías en función de la cantidad de estas.....	55
Tabla 2 Memoria necesaria para generar el modelo (crear la malla) según la cantidad y calidad de las fotografías con que trabajemos	55
Tabla 3 Valores de la cuaderna Q102. Fuente: elaboración propia.....	65
Tabla 4 Valores de la cuaderna Q104. Fuente: elaboración propia.....	66
Tabla 5 Valores de la cuaderna Q107. Fuente: elaboración propia.....	66
Tabla 6 Valores de la cuaderna Q108. Fuente: elaboración propia.....	67
Tabla 7 Valores de la cuaderna Q110. Fuente: elaboración propia.....	67
Tabla 8 Valores de la quilla. Fuente: elaboración propia	67
Tabla 9 Tabla de CCI de Cala Cativa I. Fuente: elaboración propia.....	68
Tabla 10 Valores del timón. Fuente: elaboración propia	75
Tabla 11 Valores de la zona de la popa del barco. Fuente: elaboración propia	75
Tabla 12 Tabla de CCI de Deltebre I. Fuente: elaboración propia	76

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1 Representación del CCI de Cala Cativa I. Fuente: elaboración propia.....	69
Gráfica 2 Diagrama de <i>Bland-Altman</i> de Cala Cativa I. Fuente: elaboración propia.....	70
Gráfica 3 Representación del CCI de Deltebre I. Fuente: elaboración propia	76
Gráfica 4 Diagrama de <i>Bland-Altman</i> de Deltebre I. Fuente: elaboración propia	77

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, J. R., Antoniadou, A., Hunt, C. O., Bennett, P., Croudace, I. W., Taylor, R. N., Parker, A. J. 2013. "The Belgammel Ram, a Hellenistic-Roman Bronze Proembolion Found off the Coast of Libya: Test analysis of function, date and metallurgy, with a digital reference archive." *International Journal of Nautical Archaeology*, 42(1), pp. 60–75.
- Adams, L. P. 1974. "Stereoscopic viewing of image pairs with the naked eye." *Photogrammetric Record*, 8 (44), pp. 229-30.
- Adams, L. P. 1976. "Photogrammetric survey of a stone structure between gracht walls, Golden Acre site, Cape Town." *South African Archaeological Bulletin*, 31, pp. 3-4.
- Adkins, L., Adkins, R., 1989. *Archaeological Illustration*. Cambridge University Press.
- Agrafiotis, P., Georgopoulos, A., 2015. "Camera constant in the case of two media photogrammetry." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W5), pp. 1–6.
- Albertz, J., 2001. "Albretch Meydenbauer: Pioneer of Photogrammetric Documentation of the Cultural Heritage." *Proceedings of the 18th International Symposium of CIPA*, Potsdam, pp. 19-25.
- Alfarás, R., 1894. "Pesca de ánforas." *Boletín de la Asociación Artístico-Arqueológica Barcelonesa*, núm. 40, año IV, pp. 89-94.
- Almagro, A., 2003. "De la fotogrametría a la infografía. Un proceso informatizado de información", en García Porras, A. (ed.) *Informática y Arqueología medieval*, Granada, pp.47-81
- Anderson, R. C., 1982. "Photogrammetry: The pros and cons for archaeology." *World Archaeology*, 14(2), pp. 200–205.
- Arambarri Basáñez, J., Baeza Santamaría, U., 2012. "Museos Virtuales. Un caso práctico: Museo Nacional de Arqueología Subacuática (ARQVA)." *Virtual Archaeology Review*, 3(7), 31–33.
- Avern, G. J., 2001. "A new technique for recording archaeological excavations: Research progress report". *BAR international series*, 931, pp. 3-8.
- Baker, P.E., Green, J.N., 1976. "Recording techniques used during the excavation of the Batavia." *International Journal of Nautical Archaeology*, 5, pp. 143–158.

- Balletti, C., Beltrame, C., Costa, E., Guerra, F., Vernier, P., 2015. "Underwater photogrammetry and 3D reconstruction of marble cargos shipwreck." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40, pp. 7-13.
- Balletti, C., Beltrame, C., Costa, E., Guerra, F., Vernier, P., 2016. "3D reconstruction of marble shipwreck cargoes based on underwater multi-image photogrammetry." *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 3(1), pp. 1-8.
- Bandiera, A., Alfonso, C., Auriemma, R., 2015. "Active and passive 3D imaging technologies applied to waterlogged wooden artifacts from shipwrecks." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40, pp. 15-23.
- Barker, Ph. 1977. *Techniques of Archaeological Excavation*, London.
- Barreau, J.B., Nicolas, T., Bruniaux, G., Petit, E., Petit, Q., Bernard, Y., Gouranton, V., 2014. "Ceramics Fragments Digitization by Photogrammetry, Reconstructions and Applications." *CoRR, International Conference on Cultural Heritage*. EuroMed, Lemessos, Cyprus.
- Barsanti, S. G., Remondino, F., Visintini, D., 2013. "3D Surveying and Modeling of Archaeological Sites". *SPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2, pp. 145–150.
- Bass, G. F. 1966. *Archaeology under water*. London: Thames & Hudson; New York: Frederick A. Praeger.
- Bass, G., Throckmorton, P., Joan Du Plat Taylor, Hennessy, J., Shulman, A., & Buchholz, H. 1967. "Cape Gelidonya: A Bronze Age Shipwreck." *Transactions of the American Philosophical Society*, 57(8), pp. 1-177.
- Bass, G. F. 1968. "New tools for undersea archeology." *National Geographic*, 134, pp. 402–423.
- Bass, G. F., ed. 1972. *A history of seafaring based on underwater archaeology*. London, ed. Thames and Hudson; New York: Walker.
- Bass, G. F. 1975. *Archaeology beneath the sea: A personal account*. New York: Walker.
- Bass, G.F. 1978. "Glass treasure from the Aegean." *National Geographic*, 153, pp. 768–793.

- Bass, G., Rosencrantz, D., 1973. "L'utilisation des submersibles pour les recherches et la cartographie photogrammétrique sous-marine" *L'archéologie subaquatique, une discipline naissante*. UNESCO, Paris, pp. 285-298.
- Bass, G. F., 1983. "Shipwreck archaeology in the eastern United States." *Geoscience and Man*, 23, p. 5-15.
- Bass, G. F. 1985. "Archaeologists, sport divers, and treasure-hunters." *Journal of Field Archaeology*, 12, pp. 256–258.
- Bass, G. F. 2004. "Wreck-hunting by Carolyn, a human-occupied submersible." *Sea Technology* (4)45, pp. 59–64
- Bass, G. F., 2006. "New techniques of archaeology and Greek shipwrecks of the sixth and fifth centuries BC." *Proceedings of the American Philosophical Society*, (1)150, pp. 1-14.
- Bass, G. F., 2011. "The Development of Maritime Archaeology". *The Oxford Handbook of Maritime Archaeology*, pp. 3–22.
- Bass, G. F., Rosencrantz, D., 1973. "L'utilisation des submersibles pour les recherches et la cartographie photogrammétrique sous-marine". *L'archéologie subaquatique, une discipline naissante*, pp. 285-298, Paris.
- Beltrame, C., Costa, E., 2016. "A 5th-Century-AD Sewn-Plank River Barge at St Maria in Padovetere (Comacchio-FE)" *International Journal of Nautical Archaeology*, Italy, 45(2), pp. 253-266.
- Benoit, F., 1961. "L'archéologie sous-marine en France." *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, 105^e année, 2, pp. 339-348.
- Bianco, G., Muzzupappa, M., Bruno, F., Garcia, R., Neumann, L., 2015. "A new color correction method for underwater imaging." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W5), pp. 25–32.
- Blasco Giménez, J. J., 2015. "De nubes de puntos a modelos tridimensionales." *EUBIM 2015 Congreso Internacional BIM*, pp. 181–187.
- Bohrer, F. N., 2011. *Photography and Archaeology*. London, Blackwell Publishing Ltd.
- Bojakowski, P., Bojakowski, K. C., Naughton, P., 2015. "A Comparison between Structure from Motion and Direct Survey Methodologies on the Warwick." *Journal of Maritime Archaeology*, 10(2), pp. 159-180.

- Bruno, F., Lagudi, A., Gallo, A., Muzzupappa, M., Petriaggi, B. D., Passaro, S., 2015. "3D documentation of archeological remains in the underwater Park of *Baiae*." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W5), pp. 41–46.
- Bruno, F., Bruno, S., Sensi, G. De, Luchi, M. L., Mancuso, S., Muzzupappa, M., 2010. "From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition." *Journal of Cultural Heritage*, 11(1), pp. 42–49.
- Bucci, G., 2015. "Padus, Sandalus, Gens Fadiena. Underwater Surveys in Palaeo-Watercourses (Ferrara District – Italy)." *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W5, pp. 55–60.
- Caballero Zoreda, L. (2006). "El dibujo arqueológico: Notas sobre el registro gráfico en arqueología." *Papeles del Partal*, (3), pp. 75-95.
- Cabezos Bernal, P. M., Cisneros Vivó, J. J., 2012. "Fotogrametría con cámaras digitales convencionales y software libre." *EGA Revista de Expression Grafica Arquitectonica*, 20(1), pp. 88–99.
- Canciani, M., Gambogi, P., Romano, F., Cannata, G., Drap, P., 2002. "Low cost digital photogrammetry for underwater archaeological Site survey and artifact isertion. The case study of the dolia Wreck in secche della meloria Livorno-Italia." *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIV, pp. 95–100.
- Chambah, M., Semani, D., Renouf, A., Coutellemont, P., Rizzi, A. (2004). "Underwater color constancy: enhancement of automatic live fish recognition." *16th Annual symposium on electronic imaging*, pp. 157-168.
- Chandler, J.H., Bryan, P. Fryer, J.G., 2007. "The development and application of a simple methodology for recording rock art using consumer-grade digital cameras." *The Photogrammetric Record*, 22 (117), pp. 10-21
- Charquero Ballester, A. M., 2016. "Práctica y usos de la fotogrametría digital en arqueología." *DAMA. Documentos de Arqueología Y Patrimonio Histórico*, pp. 139–157.
- Chow, S.-K., Chan, K.-L., 2009. "Reconstruction of photorealistic 3D model of ceramic artefacts for interactive virtual exhibition." *Journal of Cultural Heritage*, 10(2), PP. 161–173.
- Ciani, J. B., Hunter, E. K., Dowling, C. B., Brunk, D. H., 1971. "Sea floor surveying by divers." *ASCE J Surv Mapp Div*, 97(SU2), pp. 149-164.

- Clarkson, C., Hiscock, P., 2011. "Estimating original flake mass from 3D scans of platform area." *Journal of Archaeological Science*, 38(5), pp. 1062–1068.
- Cooper, M. A. R., 1984. "Deformation Measurement by Photogrammetry." *The Photogrammetric Record*, 11(63), pp. 291–301.
- Costa, E., Balletti, C., Beltrame, C., Guerra, F., Vernier, P., 2016. "Digital survey techniques for the documentation of wooden shipwrecks." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41, pp. 237-242.
- D'Amelio, S., Maggio, V., Villa, B., 2015. "3D modeling for underwater archaeological documentation: Metric verifications." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W5), pp. 73–77.
- De Juan Fuertes, C. de, Cibecchini F. y Vento, E., 2011. "El pecio altoimperial de Bou Ferrer (La Vila Joiosa-Alicante). Estado actual de la investigación". Nieto *et al.* ed. *Actas de las Jornadas de ARQUA 2011*, pp. 109-116.
- De Juan Fuertes, C. de, Cibecchini F. y Miralles, J.S., 2013. "El pecio Bou Ferrer (La Vila Joiosa-Alicante). Nuevos datos sobre su cargamento y primeras evidencias de la arquitectura naval". Nieto *et al.* (éd.) *Actas I Congreso de Arqueología Náutica y Subacuática Española.*, pp. 133-149.
- De Reu, J., De Smedt, P., Herremans, D., Van Meirvenne, M., Laloo, P., De Clercq, W., 2014. "On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice." *Journal of Archaeological Science*, 41, pp. 251-262.
- Demesticha, S., 2011. "The 4th-Century-BC Mazotos Shipwreck, Cyprus: A preliminary report." *International Journal of Nautical Archaeology*, 40(1), pp. 39-59.
- Demesticha, S., Skarlatos, D., Neophyto, A., 2014. "The 4th-century B.C. Shipwreck at Mazotos, Cyprus: New techniques and methodologies in the 3D mapping of shipwreck excavations." *Journal of Field Archaeology*, 39(2), pp. 134-150.
- Dennett, S., Muessig, H., Turpin, S. A. and Watson, R. P., 1979. "Stereophotogrammetric documentation of exposed archaeological features." *Journal of Field Archaeology*, 6, pp. 329-37.
- Diamanti, E., Vlachaki, F., 2015. "3D recording of underwater Antiquities in the South Euboean Gulf." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40, p. 93.

- Discamps, E., Muth, X., Gravina, B., Lacrampe-Cuyaubère, F., Chadelle, J.P., Faivre, J.P., Maureille, B., 2016. "Photogrammetry as a tool for integrating archival data in archaeological fieldwork: Examples from the Middle Palaeolithic sites of Combe–Grenal, Le Moustier, and Regourdou." *Journal of Archaeological Science: Reports*, 8(Supplement C), pp. 268–276.
- Donati, J. C., Sarris, A., 2016. "Geophysical survey in Greece: Recent developments, discoveries and future prospects." *Archaeological Reports*, 62, pp. 63-76.
- Dorrell, P., 1994. *Photography in Archaeology and Conservation (Cambridge Manuals in Archaeology)*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Drap, P., Seinturier, J., Scaradozzi, D., Gambogi, P., Long, L., Gauche, F., 2006. "Photogrammetry for Virtual Exploration of Underwater Archeological Sites". *XXI International CIPA Symposium*, Atenas, pp. 1–6.
- Drap, P., 2012. "Underwater Photogrammetry for Archaeology". *Special Applications of Photogrammetry*, In Tech Publisher, pp. 111-136.
- Drap, P., Merad, D., Mahiddine, A., Seinturier, J., Peloso, D., Boï, J.M., Long, L., 2013. "Underwater Photogrammetry for Archaeology. What Will Be the Next Step?" *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 2(3), pp. 375–394.
- Drap, P., Seinturier, J., Hijazi, B., Merad, D., Boi, J. M., Chemisky, B., Long, L., 2015. "The ROV 3D project: Deep-sea underwater survey using photogrammetry: Applications for underwater archaeology." *Journal on Computing and Cultural, ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, (8)4, 21, pp. 1-21
- Drap, P., Merad, D., Hijazi, B., Gaoua, L., Nawaf, M. M., Saccone, M., Castro, F., 2015. "Underwater photogrammetry and object modeling: A case study of Xlendi wreck in Malta." *Sensors (Switzerland)*, 15(12), pp. 30351–30384.
- Drager, D. L., Lyons, T. R., 1985. "Remote sensing: photogrammetry in archeology: The Chaco Mapping Project. Branch of Remote Sensing, Cultural Resources Management." National Park Service, U.S. Dept. of the Interior.
- Faig, W., 1978. "Photogrammetric surveys of underwater objects" *Proceedings coastal mapping symposium*, pp. 183-187.
- Fatuzzo, G., Mussumeci, G., Oliveri, S. M., Sequenzia, G., 2011. The "'Guerriero di Castiglione": reconstructing missing elements with integrated non-destructive 3D modelling techniques." *Journal of Archaeological Science*, 38(12), pp. 3533–3540.

- Forte, M., Kurillo, G., 2010. "Cyberarchaeology: Experimenting with teleimmersive archaeology. In *Virtual Systems and Multimedia (VSMM)*" *16th International Conference on IEEE*, pp. 155-162.
- Forte, M., 2011. "Cyber-Archaeology: Notes on the simulation of the past." *Virtual Archaeology Review*, 2(4), pp. 7–18.
- Forte, M., Editors, S. C., 2017. *Digital Methods and Remote Sensing in Archaeology: Archaeology in the Age of Sensing*, Springer, pp. 271–289.
- Forssmann, A., 2016. "Descubiertos más de Descubiertos más de 40 naufragios en el mar Negro." Obtenida el 20 de febrero de 2017 de http://www.nationalgeographic.com.es/historia/actualidad/descubiertos-mas-naufragios-mar-negro_10771
- Frischer, B., Favro, D., Liverani, P., Blaauw, S., Abernathy, D., 2000. "Virtual Reality and Ancient Rome: The UCLA Cultural VR Lab's Santa Maria Maggiore Project", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV-5/W10, pp. 155–162.
- Fulton, C., Viduka, A., Hutchison, A., Hollick, J., Woods, A., Sewell, D., Manning, S., 2016. Use of Photogrammetry for Non-Disturbance Underwater Survey. *Advances in Archaeological Practice*, 4(1), pp. 17–30.
- Fussell, A., 1982. "Terrestrial photogrammetry in archaeology." *World Archaeology*, 14(2), pp. 157–172.
- Gawlik, N., 2014. "3D modelling of underwater archaeological artefacts". Norwegian University of Science and Technology department of Civil and Transport Engineering, pp. 1–97.
- Geli, R. (2012). *El derelict Aiguablava I: Un exemple de comerç de vi de la tarraconense en època d'August*, Tesina inédita, Universitat de Girona (UdG).
- González, S.R., 2001. "Los usos de la fotografía en favor de la arqueología como ciencia moderna. Francia 1850-1914". *CuPAUAM*, 27, pp. 163-182.
- Green, J.N., Baker, P.E., Richards, B., Squire, D. M., 1971. "Simple underwater photogrammetric techniques." *Archaeometry*, 13(2), pp. 221-233.
- Green, J., 2004. *Maritime Archaeology A Technical Handbook* (Second). London, Elsevier Academic Press.
- Guidi, G., Beraldin, J.A., Atzeni, C.: "High-accuracy 3D modeling of cultural heritage: the digitizing of Donatello's Maddalena." *13th IEEE Transactions on image processing* 13(3), pp. 370–380.

- Gutehall, A., 2016. "Hand drawing versus photogrammetry: A Comparative Case Study of Two Techniques for Archaeological Documentation", en: *Why 3D? Challenges and solutions with the use of 3D visualizations in archaeology*, Department of Archaeology at Aarhus University, Moesgård, Øhavsmuseet Faaborgs Forlag, pp. 51-62.
- Hageman, J. B., Bennett, D. A., 2000. "Construction of digital elevation models for archaeological applications." *Practical Applications of GIS for Archaeologists: A Predictive Modelling Toolkit*, pp. 121-136.
- Helmholz, P., Long, J., Munsie, T., Belton, D., 2016. "Accuracy assessment of Go pro hero 3 (Black) camera in underwater environment." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41(July), pp. 477–483.
- Henderson, J., Pizarro, O., Johnson-Roberson, M., Mahon, I., 2013. "Mapping submerged archaeological sites using stereovision photogrammetry." *International Journal of Nautical Archaeology*, 42(2), pp. 243-256.
- Hendrickx, M., Gheyle, W., Bonne, J., Bourgeois, J., Wulf, A. De, Goossens, R., 2011. "The use of stereoscopic images taken from a microdrone for the documentation of heritage – An example from the Tuekta burial mounds in the Russian Altay." *Journal of Archaeological Science*, 38(11), pp. 2968–2978.
- Hoehle, J., 1971. "Reconstruction of the underwater object." *Photogrammetry Engeneering*, 37, pp. 948–954.
- Hoppe K.N. 2002. "Teredo Navalis — the Cryptogenic Shipworm" In: Leppäkoski E., Gollasch S., Olenin S. (eds) *Invasive Aquatic Species of Europe. Distribution, Impacts and Management*. Springer, Dordrecht, pp. 116–119.
- Howland, M. D., Kuester, F., Levy, T. E. (2014). "Photogrammetry in the field: Documenting, recording, and presenting archaeology." *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 14(4), pp. 101-108.
- Hulot, O., Jaouen, M., Barreau, J. B., Bernard, Y., Petit, Q., Gaugne, R., Gouranton, V., 2015. "Study of a wreck in foreshore context." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W5), pp. 131–138.
- Iqbal, K., Salam, R. A., Osman, A., Talib, A. Z., 2007. "Underwater Image Enhancement Using an Integrated Colour Model." *International Journal of Computer Science*, 34(2), pp. 239–244.

- Jaklič, A., Erič, M., Mihajlović, I., Stopinšek, Ž., Solina, F., 2015. "Volumetric models from 3D point clouds: The case study of sarcophagi cargo from a 2nd/3rd century AD Roman shipwreck near Sutivan on island Brač, Croatia." *Journal of Archaeological Science*, 62, pp. 143-152.
- Jordan, J., Dumas, R., 2009. *French Battleships 1922-1956*. Seaforth Publishing.
- Kalantari, M., Kasser, M., 2007. "Implementation of a low-cost photogrammetric methodology for 3D modelling of ceramic fragments." *XXI International CIPA Symposium*, Athens, Greece (p. FP079).
- Katsouri, I., Tzanavari, A., Herakleous, K., Poullis, C., 2015. "Visualizing and assessing hypotheses for marine archaeology in a VR CAVE environment." *Journal on Computing and Cultural*, 8(2), artículo 10: 1-18.
- Katz, D. and Friess, M., 2014. "Technical Note: 3D From Standard Digital Photography of Human Crania—A Preliminary Assessment." *American Journal of Physical Anthropolgy*, 154, pp. 152–158
- Kralj, V. Z., Beltrame, C., Miholjek, I., Ferri, M., 2016. "A Byzantine Shipwreck from Cape Stoba, Mljet, Croatia: An interim report." *International Journal of Nautical Archaeology*, 45(1), pp. 42–58.
- Koutsoudis, A., Chamzas, C., 2011. "3D pottery shape matching using depth map images." *Journal of Cultural Heritage*, 12(2), pp. 128–133.
- Laussedat, A., 1899. *La métrophotographie*. Paris, Gauthier-Villars.
- Laussedat, A. 1854. *Mémoire sur l'emploi de la chambre claire dans les reconnaissances topographiques*. Paris: Mallet-Bachelier.
- Laussedat, A. 1859. "Mémoire sur l'emploi de la photographie dans la levée des plans". *Compte Rendu Des Seances De L'Academie Des Scineces*, (49)20, pp. 732-734.
- Lin, S. C. H., Douglass, M. J., Holdaway, S. J., Floyd, B., 2010. "The application of 3D laser scanning technology to the assessment of ordinal and mechanical cortex quantification in lithic analysis." *Journal of Archaeological Science*, 37(4), pp. 694–702.
- Linder, W., 2016. *Digital Photogrammetry: A Practical Course*. 4^a ed., Springer, Berlin/London.
- Leidwanger, J., Tusa, S., 2015. "Marzamemi II 'Church wreck' excavation: 2014 field season." *Archaeologia Maritima Mediterranea*, 12.

- Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., Villaverde, V., 2010. "Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study." *Journal of Archaeological Science*, 37(3), pp. 499–507.
- Ludvigsen, M., Eustice, R., Singh, H., 2006. "Photogrammetric models for marine archaeology." *OCEANS, IEEE*. pp. 1–6.
- Maas, H. G., 2015. "Modular Geometric Model for Underwater Photogrammetry". *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W5 (April), pp. 139–141.
- Macaluso, P. J., 2011. "Sex discrimination from the acetabulum in a twentieth-century skeletal sample from France using digital photogrammetry." *HOMO - Journal of Comparative Human Biology*, 62(1), pp. 44–55.
- Mann, R., Gallager, S. M., 1985. "Physiological and biochemical energetics of larvae of *Teredo navalis* L. and *Bankia gouldi* (Bartsch) (Bivalvia: Teredinidae)." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 85(3), pp. 211–228.
- Mayans, C., 2015. "El pecio Bou Ferrer: Un naufragio en la época de Nerón." *Historia Nacional Geographic*, 136, pp. 90-92.
- Maarleveld, T.J.; Guérin, U.; Egger, B., 2013. *Manual for activities directed at underwater cultural heritage: Guidelines to the Annex of the UNESCO 2001 Convention*. UNESCO
- McCarthy, J., Robertson, P., Mackay, E., 2015. "Discovery and survey and of a 17th-18th century shipwreck near Drumbeg, NW Scotland: An initial report." *International Journal of Nautical Archaeology*, 44(1).
- McCarthy, J., 2014. "Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community engagement." *Journal of Archaeological Science*, 43(1), pp. 175–185.
- McCarthy, J., Benjamin, J., 2014. "Multi-image Photogrammetry for Underwater Archaeological Site Recording: An Accessible, Diver-Based Approach." *Journal of Maritime Archaeology*, 9(1), pp. 95–114.
- Méndez, J. L. S., 2003. "La conservación de la madera en arqueología subacuática: Museo y Centro Nacional de Investigación Arqueológicas Submarinas." *Monte Buciero*, (9), pp. 225-266.
- Menna, F., Nocerino, E., Troisi, S., Remondino, F., 2015. "Joint alignment of underwater and above-the-water photogrammetric 3D models by independent models

- adjustment." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40.
- Mertes, J., Thomsen, T., Gulley, J., 2014. "Evaluation of Structure from Motion Software to Create 3D Models of Late Nineteenth Century Great Lakes Shipwrecks Using Archived Diver-Acquired Video Surveys." *Journal of Maritime Archaeology*, 9(2).
- Miñano, A. I., Fernández, F., Casabán, J. L., 2012. "Métodos de documentación arqueológica aplicados en arqueología subacuática: el modelo fotogramétrico y el fotomosaico del pecio fenicio Mazarrón-2 (Puerto de Mazarrón, Murcia)." *Saguntum*, (44), pp. 99–109.
- Miyatsuka, Y., 1996. "Archaeological real-time photogrammetric system using digital still camera." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31, pp. 374-377.
- Moisan, E., Charbonnier, P., Foucher, P., Grussenmeyer, P., Guillemain, S., Koehl, M., 2015. "Building a 3D reference model for canal tunnel surveying using SONAR and LASER scanning." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40.
- Moya, J. A., 2017. *Fotografía y Fotogrametría subacuática aplicadas al patrimonio cultural sumergido*. Universidad de Alicante, Alicante.
- Nieto, F. J., 1984. *Introducción a la arqueología subacuática*, Ed. CYMYS, Barcelona.
- Núñez, M. A., Buill, F., Edo, M., 2013. "3D model of the Can Sadurní cave." *Journal of Archaeological Science*, 40(12), pp. 4420–4428.
- Rabinowitz, A., 2015. "The work of archaeology in the age of digital surrogacy", en: B. R. Olson, W. R. Caraher (Eds.), *Visions of substance: 3D imaging in Mediterranean archaeology*, The Digital Press, The University of North, Dakota, pp. 27–42.
- Papadimitriou, K., 2015. "Course outline for a scuba diving speciality "underwater survey diver." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40.
- Payne, A., K. Cole, K. Simon, C. Goodmaster and F. Limp 2010. "Designing the Next Generation Virtual Museum: Making 3D Artifacts Available for Viewing and Download" Frischer, B., J. Webb Crawford and D. Koller (eds.), *Making History Interactive. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*. 37th International Conference, Williamsburg, Virginia, United States of America, 22-26, Archaeopress, Oxford, pp. 292-297.

- Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V., Chamzas, C., 2007. "Methods for 3D digitization of Cultural Heritage." *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), pp. 93–98.
- Pruno, E., Marcotulli, C., Vannini, G., Drap, P., 2015. "Underwater photogrammetry methods for a peculiar case study: San Domenico (Prato-Italy)." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W5), pp. 171–176.
- Pollio, J., 1968. Application of underwater photogrammetry. *Naval Oceanographic Office NSTL Station MS*, 46. (No. NOO-IR-68-52).
- Raurich, X., 1994. "El Jaciment de Cala Cativa: notes sobre el primer treball d'arqueologia subaquàtica realitzat a Catalunya". *Annals de l'IEE*, núm 27, Figueres.
- Repola, L., Memmolo, R., Signoretti, D., 2015. "Instruments and methodologies for the underwater tridimensional digitization and data musealization." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W5), pp. 183–190.
- Robert, E., Petrognani, S., Lesvignes, E., 2016. "Applications of digital photography in the study of Paleolithic cave art." *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10(Supplement C), pp. 847–858.
- Roghi, G., 1958-1959. "Note tecniche sul rilevamento e lo scavo della nave romana di Spargi." *Bollettino e atti* (Centro Italiano de Ricercatori Subacquei), pp. 9-20.
- Roghi, G., 1959. "La segunda campana de Scavi sotto marina sulla nave romana di Spargi (Sardegna)." *Rivista di studi liguri*, 25, pp. 301-302.
- Rosencrantz, D. M., 1975. "Underwater Photography and Photogrammetry, in: Photography in Archaeological Research." *School of American Research Advanced Seminar Series*. University of New Mexico Press: Albuquerque. Pp. 265–309.
- Rua, H., Alvito, P., 2011. "Living the past: 3D models, virtual reality and game engines as tools for supporting archaeology and the reconstruction of cultural heritage – the case-study of the Roman villa of Casal de Freiria." *Journal of Archaeological Science*, 38(12), pp. 3296–3308.
- Sanders, D. H., 2012. "Virtual Reconstruction of Maritime Sites and Artifacts.", en: *The Oxford Handbook of Maritime Archaeology*.
- Sanz, J. O., de la Luz Gil Docampo, M., Rodríguez, S. M., Sanmartín, M. T. R., Cameselle, G. M., 2010. "A simple methodology for recording petroglyphs using low-cost

- digital image correlation photogrammetry and consumer-grade digital cameras." *Journal of Archaeological Science*, 37(12), pp. 3158–3169.
- Savara, B. S., 1965, "Applications of photogrammetry for quantitative study of tooth and face morphology." *American Journal of Physical Anthropology*, 23, pp. 427–434.
- Simpson, A. and Clogg, P. and Diaz-Andreu, M. and Larkman, B., 2004. "Towards three-dimensional non-invasive recording of incised rock art." *Antiquity*, 78 (301) (2004), pp. 692-698
- Skarlatos, D., Rova, M., 2010. "Photogrammetric approaches for the archaeological mapping of the Mazotos shipwreck." *7th International Conference on Science and Technology in Archaeology and Conservation, Petra*.
- Troisi, S., Del Pizzo, S., Gaglione, S., Miccio, A., Testa, R. L., 2015. "3D models comparison of complex shell in underwater and dry environments" *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W5), pp. 215–222.
- Tung, Y.-Y., 2015. "Taiwan's underwater cultural heritage documentation management." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40.
- Ucelli, G., 1950. *Le navi di Nemi*. Libreria dello Stato, Roma.
- Van Damme, T., 2015. "Computer Vision Photogrammetry for underwater archaeological site recording in a low-visibility environment." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40.
- Vargas, E. C., 1992. *La fotografía aérea y su aplicación a estudios geológicos y geomorfológicos: principios de percepción remota*. Universidad Mayor de San Andrés.
- Vivar, G., Geli, R., Nieto, X., 2014. Deltebre I. "Un barco hundido en la desembocadura del Ebro durante la Guerra del Francés" *I Congreso de Arqueología Náutica y Subacuática Española, Museo Nacional de Arqueología Subacuática, Cartagena*, pp. 279-287.
- Vivar, G., Geli, R., 2014a. *Memòria de la intervenció arqueològica subaquàtica al jaciment de Cap de Vol 2014 (El Port de la Selva, Alt Empordà)*
- 2014b. *Memòria de la intervenció arqueològica subaquàtica al jaciment Deltebre I 2014 (Deltebre, Baix Ebre)*

- 2015a. *Informe de la intervenció arqueològica subaquàtica al jaciment de Cala Cativa I 2015 (El Port de la Selva, Alt Empordà)*
- 2015b. *Informe de la intervenció arqueològica subaquàtica al jaciment Deltebre I 2015 (Deltebre, Baix Ebre)*
- 2016a. *Informe de la intervenció arqueològica subaquàtica al jaciment de Cala Cativa I 2016 (El Port de la Selva, Alt Empordà). Projecte de recerca (2014-2017): Estudi del comerç, l'exportació i les xarxes de redistribució del vi entre els segles I aC i II dC. al Conventus Tarraconensis.*
- 2016b. *Informe de la intervenció arqueològica subaquàtica al jaciment Deltebre I 2016 (Deltebre, Baix Ebre)*

Vivar, G., Mayoral, J., 2017. *Informe de la intervenció arqueològica subaquàtica al jaciment Deltebre I 2017 (Deltebre, Baix Ebre)*

Velios, A. and J.P. Harrison., 2001. "Capturing 3-D Archaeological Objects: a Comparison of Quality and Practicality" Burenhult, G. and J. Arvidsson (eds.), *Archaeological Informatics: Pushing The Envelope. CAA2001. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 29th Conference*, Gotland, Archaeopress, Oxford, pp. 567-574.

Yamafune, K.; Torres, R.; Castro, F., 2016. "Multi-Image Photogrammetry to Record and Reconstruct Underwater Shipwreck Sites." *Journal of Archaeological Method and Theory*, pp. 703-725.

Yilmaz, H. M., 2010. "Close range photogrammetry in volume computing." *Experimental Techniques*, 34(1), pp. 48-54.

Zhukovsky, M. O., Kuznetsov, V. D., Olkhovsky, S. V., 2013. "Photogrammetric techniques for 3-D underwater record of the antique time ship from Phanagoria." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40, pp. 717-721.

ANEXO

1A	1B	1C	1D	1E	1F	1G	1H
2A	2B	2C	2D	2E	2F	2G	2H
3A	3B	3C	3D	3E	3F	3G	3H
4A	4B	4C	4D	4E	4F	4G	4H
5A	5B	5C	5D	5E	5F	5G	5H
6A	6B	6C	6D	6E	6F	6G	6H

Patch	Name	Lab			sRGB			Adobe RGB		
		L*	a*	b*	R	G	B	R	G	B
1A	Low Sat. Red	61.35	34.81	18.38	210	121	117	189	121	117
2A	Low Sat. Yellow	75.5	5.84	50.42	216	179	90	205	178	96
3A	Low Sat. Green	66.82	-25.1	23.47	127	175	120	141	174	122
4A	Low Sat. Cyan	60.53	-22.6	-20.4	66	157	179	103	156	177
5A	Low Sat. Blue	59.66	-2.03	-28.46	116	147	194	125	146	191
6A	Low Sat. Magenta	59.15	30.83	-5.72	190	121	154	172	120	151
1B	10% Red Tint	82.68	5.03	3.02	218	203	201	213	202	200
2B	10% Green Tint	82.25	-2.42	3.78	203	205	196	202	204	195
3B	10% Blue Tint	82.29	2.2	-2.04	206	203	208	204	201	206
4B	90% Red Tone	24.89	4.43	0.78	66	57	58	66	60	60
5B	90% Green Tone	25.16	-3.88	2.13	54	61	56	59	63	59
6B	90% Blue Tone	26.13	2.61	-5.03	63	60	69	65	63	71
1C	Lightest Skin	85.42	9.41	14.49	237	206	186	225	202	183
2C	Lighter Skin	74.28	9.05	27.21	211	175	133	200	174	134
3C	Moderate Skin	64.57	12.39	37.24	193	149	91	180	148	95
4C	Medium Skin	44.49	17.23	26.24	139	93	61	127	93	65
5C	Deep Skin	25.29	7.95	8.87	74	55	46	71	58	50
6C	95% Gray	22.67	2.11	-1.1	57	54	56	59	57	59
1D	5% Gray	92.72	1.89	2.76	241	233	229	238	233	229
2D	10% Gray	88.85	1.59	2.27	229	222	220	226	221	219
3D	30% Gray	73.42	0.99	1.89	182	178	176	180	177	174
4D	50% Gray	57.15	0.57	1.19	139	136	135	137	135	134
5D	70% Gray	41.57	0.24	1.45	100	99	97	99	99	98
6D	90% Gray	25.65	1.24	0.05	63	61	62	65	63	64
1E	Card White	98.04	2.16	2.6	249	242	238	247	242	237
2E	20% Gray	80.44	1.17	2.05	202	198	195	199	196	193
3E	40% Gray	65.52	0.69	1.86	161	157	154	158	156	153
4E	60% Gray	49.62	0.58	1.56	122	118	116	120	118	115
5E	80% Gray	33.55	0.35	1.4	80	80	78	81	81	79
6E	Card Black	16.91	1.43	-0.81	43	41	43	46	46	47
1F	Primary Cyan	47.12	-32.5	-28.75	0	127	159	39	126	157
2F	Primary Magenta	50.49	53.45	-13.55	192	75	145	167	76	141
3F	Primary Yellow	83.61	3.36	87.02	245	205	0	234	204	37
4F	Primary Red	41.05	60.75	31.17	186	26	51	159	32	53
5F	Primary Green	54.14	-40.8	34.75	57	146	64	94	145	71
6F	Primary Blue	24.75	13.78	-49.48	25	55	135	41	58	132
1G	Primary Orange	60.94	38.21	61.31	222	118	32	198	117	44
2G	Blueprint	37.8	7.3	-43.04	99	86	96	70	89	156
3G	Pink	49.81	46.5	15.76	195	79	95	170	80	94
4G	Violet	28.88	19.36	-24.48	83	58	106	78	61	104
5G	Apple Green	72.45	-23.6	60.47	157	188	54	165	186	69
6G	Sunflower	71.65	23.74	72.28	238	158	25	218	157	46
1H	Aqua	70.19	-31.9	1.98	98	187	166	130	186	166
2H	Lavender	54.38	8.84	-25.71	126	125	174	125	124	171
3H	Evergreen	42.03	-15.8	22.93	82	106	60	90	106	65
4H	Steel Blue	48.82	-5.11	-23.08	87	120	155	98	119	152
5H	Classic Light Skin	65.1	18.14	18.68	197	145	125	183	144	125
6H	Classic Dark Skin	36.13	14.15	15.78	112	76	60	103	77	63

Ilustración 1 Tabla completa de valores de *SpyderCheckr* de 48 colores. Fuente: Manual *SpyderCheckr*.

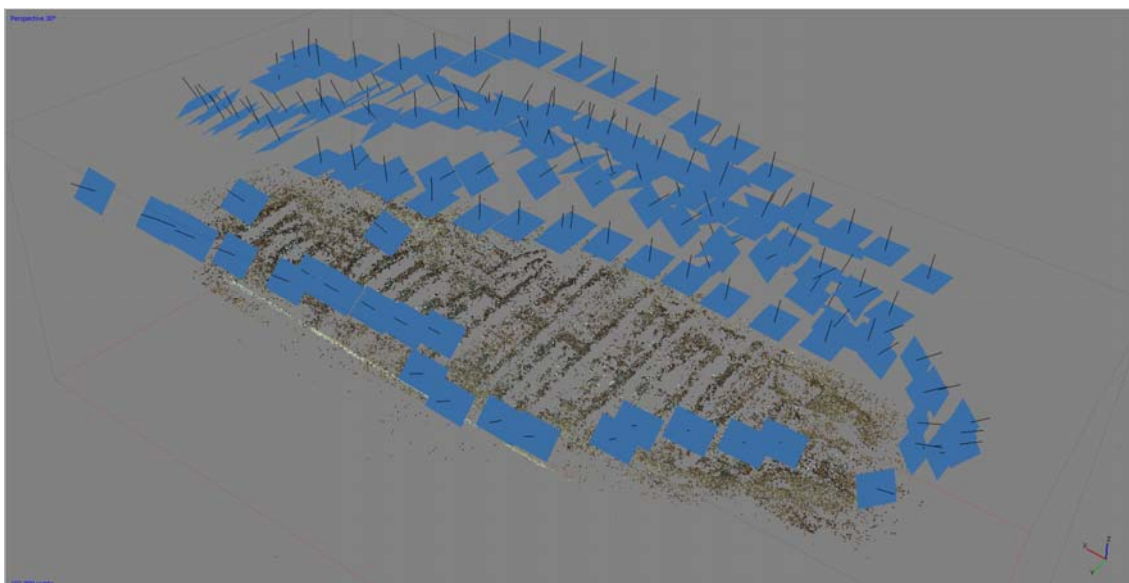


Ilustración 2 Orientación de fotografías (los recuadros azules) Cala Cativa I 2015. Fuente: elaboración propia.

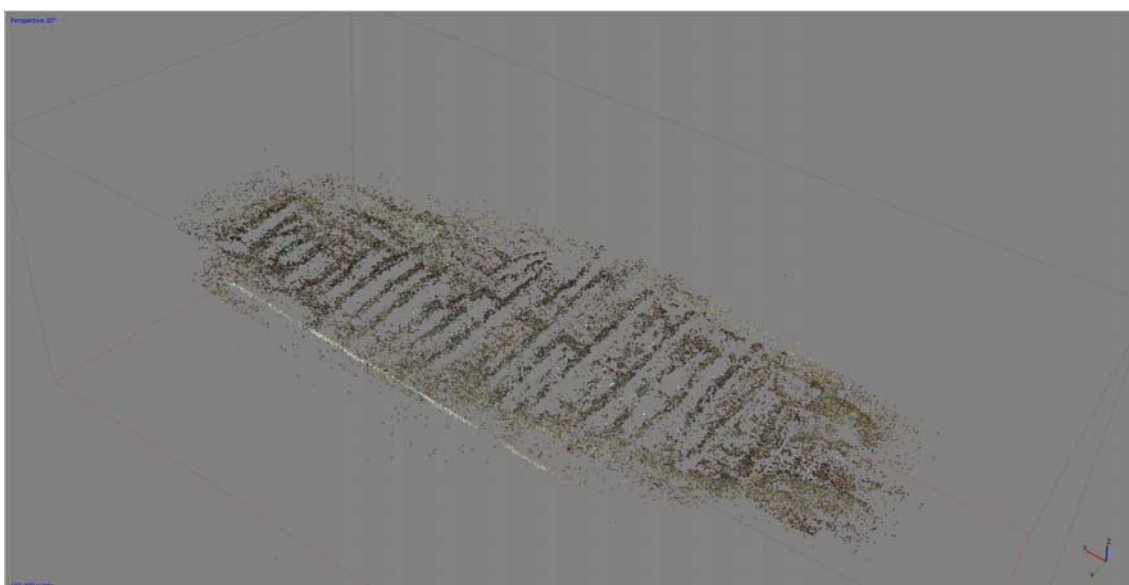


Ilustración 3 Nube dispersa de puntos Cala Cativa I 2015. Fuente: elaboración propia.

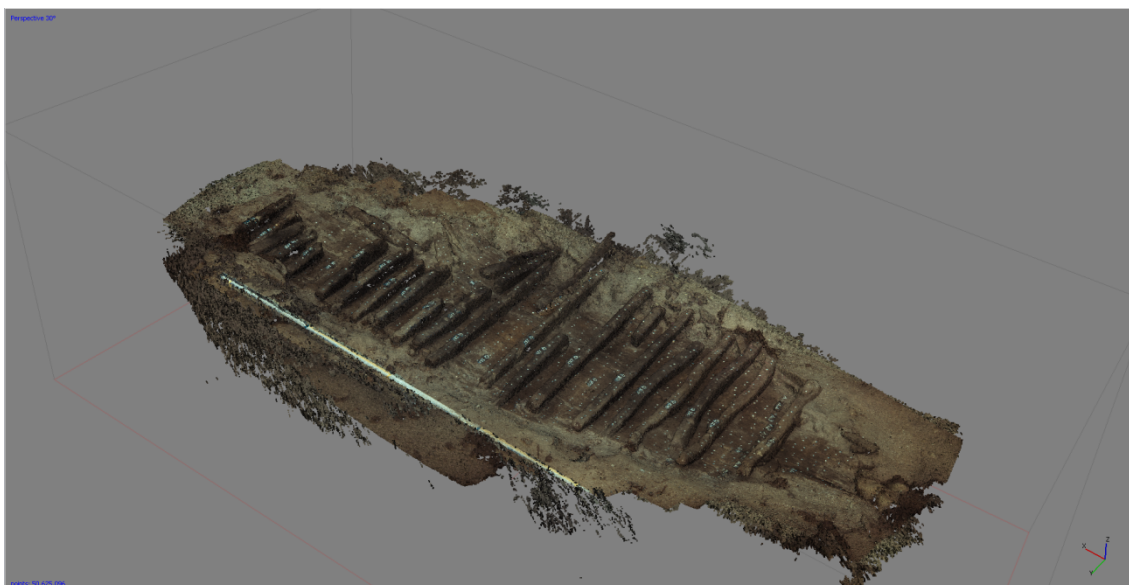


Ilustración 4 Nube densa de puntos Cala Cativa I 2015. Fuente: elaboración propia.

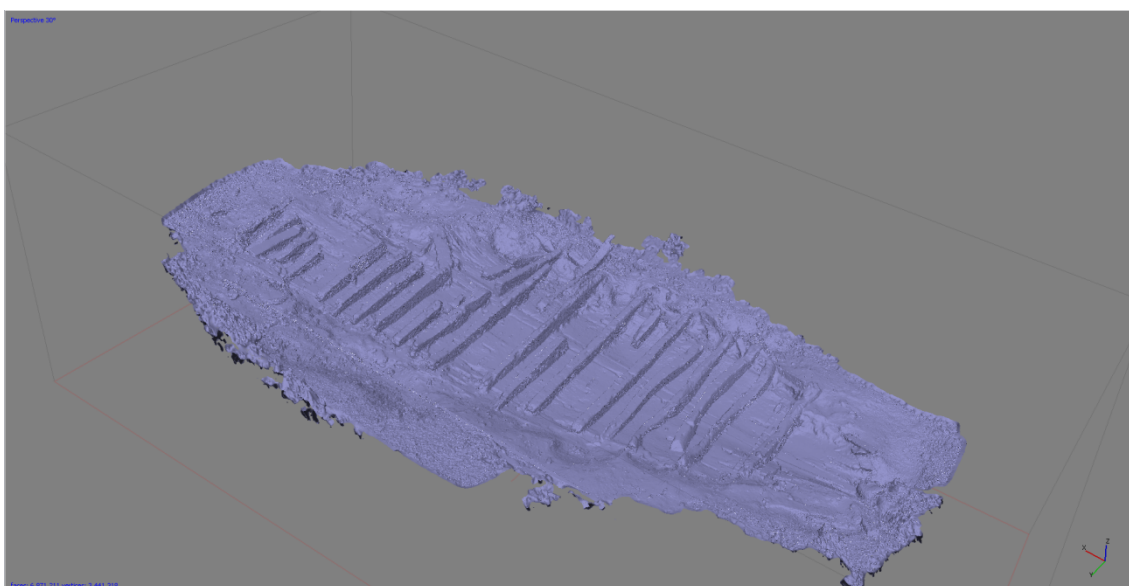


Ilustración 5 Malla del modelo 3D Cala Cativa I 2015. Fuente: elaboración propia.

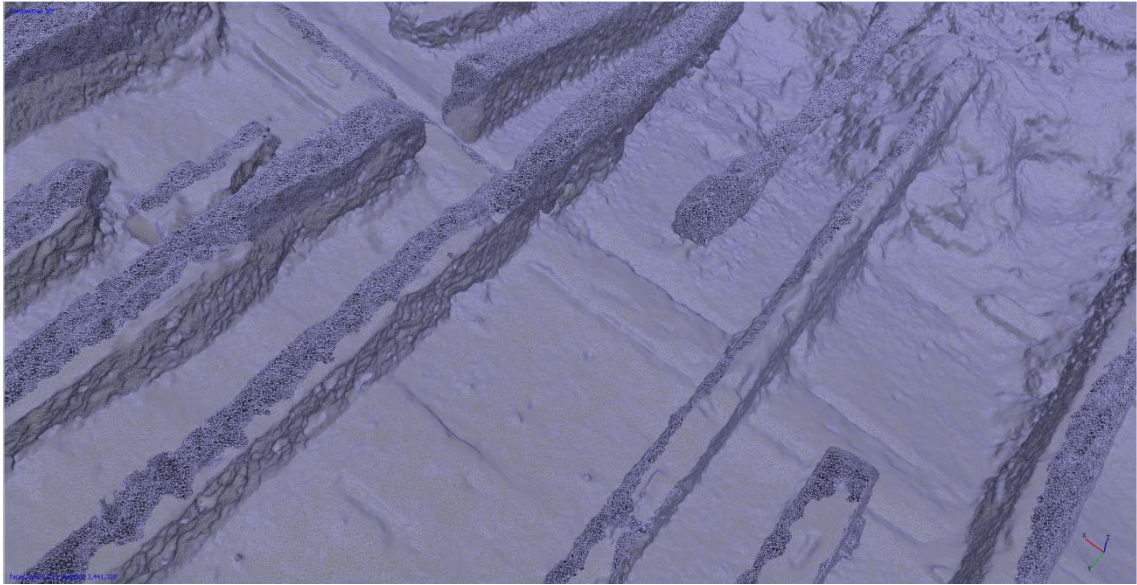


Ilustración 6 Detalle de la malla del modelo 3D Cala Cativa I 2015. Fuente: elaboración propia.

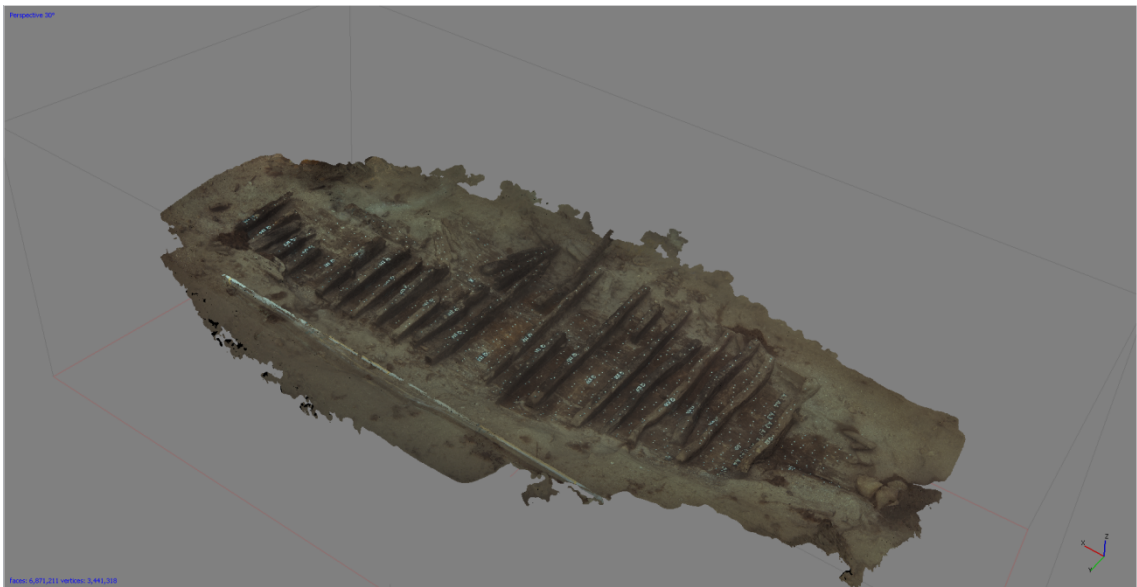


Ilustración 7 Modelo 3D con texturas Cala Cativa I 2015. Fuente: elaboración propia.



Ilustración 10 Nube dispersa de puntos Cala Cativa I 2016. Fuente: elaboración propia.



Ilustración 11 Nube densa de puntos Cala Cativa I 2016. Fuente: elaboración propia.

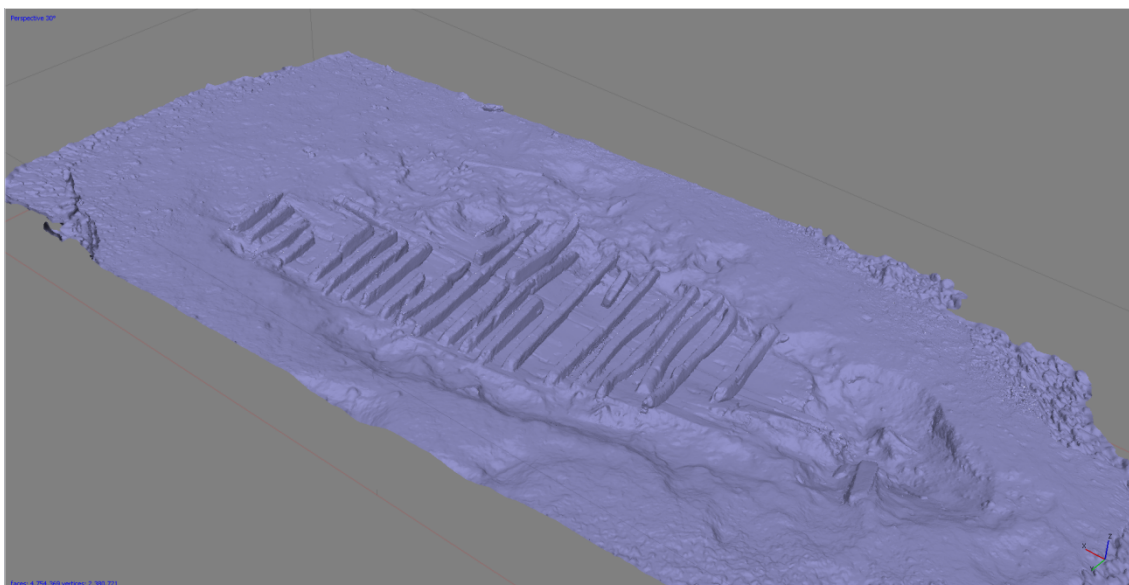


Ilustración 12 Malla del modelo 3D Cala Cativa I 2016. Fuente: elaboración propia.

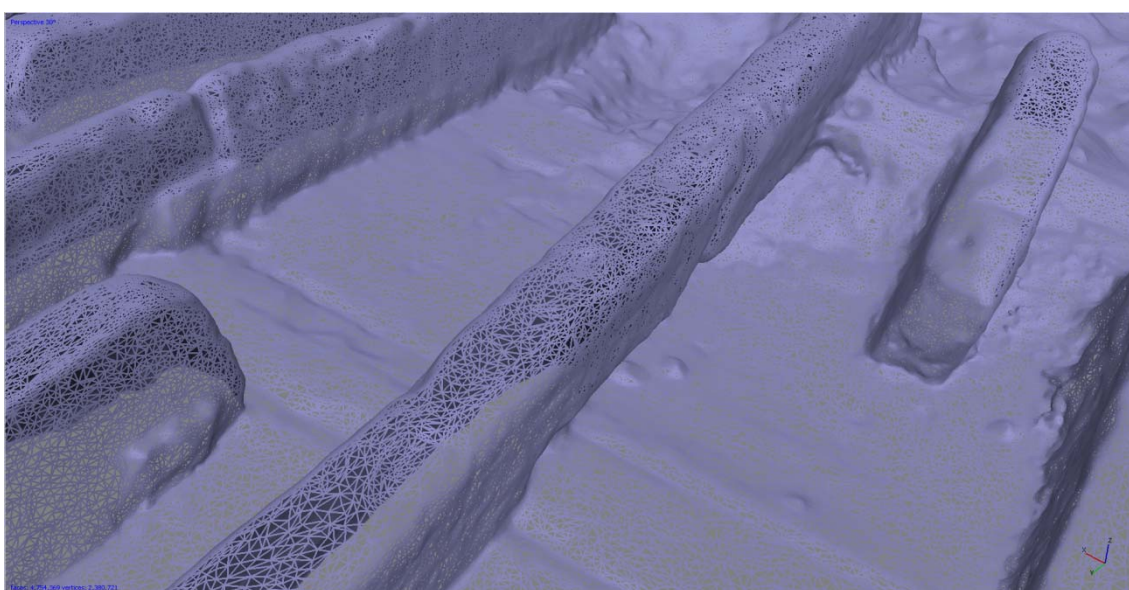


Ilustración 13 Detalle de la malla del modelo 3D Cala Cativa I 2016. Fuente: elaboración propia.

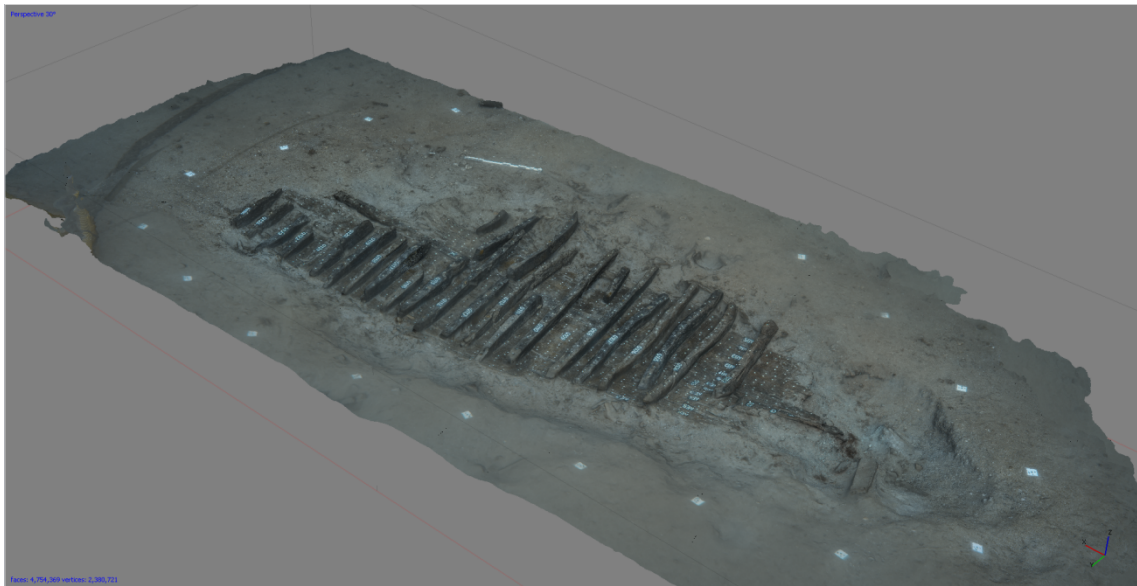


Ilustración 14 Modelo 3D con texturas Cala Cativa I 2016. Fuente: elaboración propia.

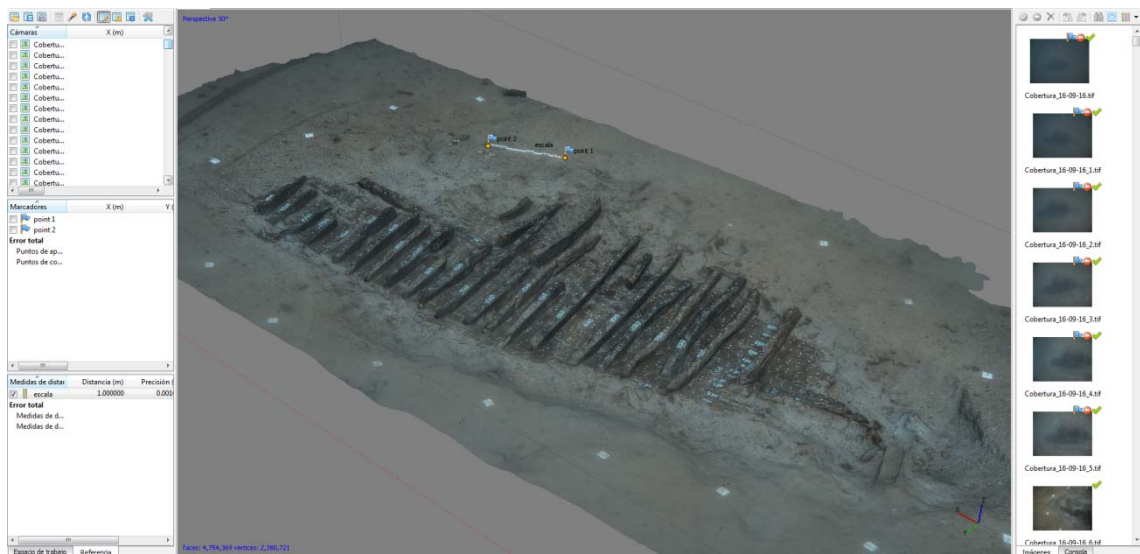


Ilustración 15 Establecimiento escala métrica Cala Cativa I 2016. Fuente: elaboración propia.



Ilustración 16 Ortofotografía resultante Cala Cativa I 2016. Fuente: elaboración propia.

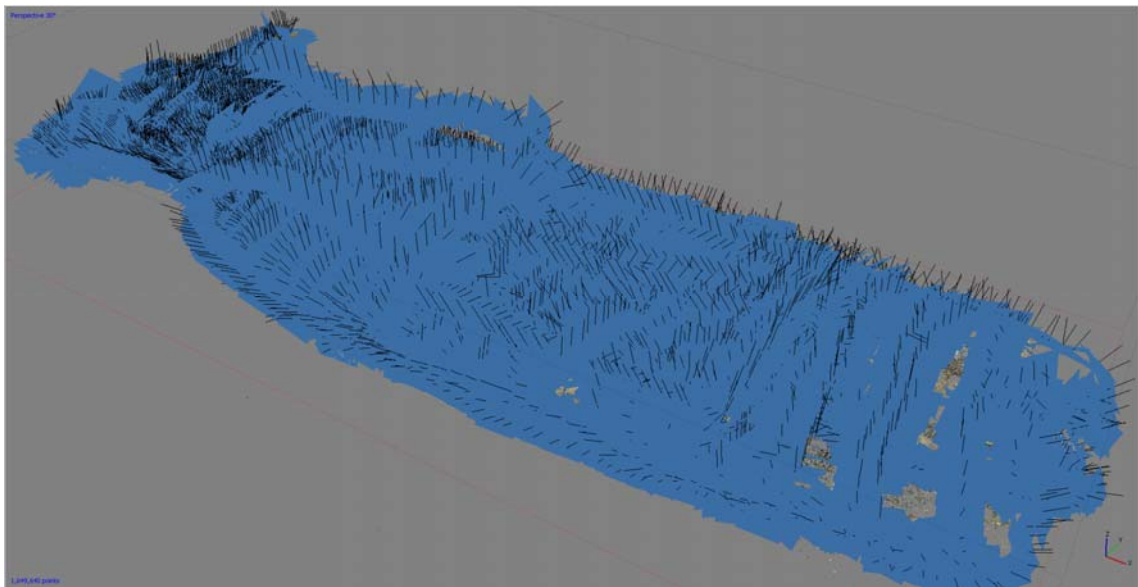


Ilustración 17 Orientación de fotografías (los recuadros azules) Deltebre I. Fuente: elaboración propia.

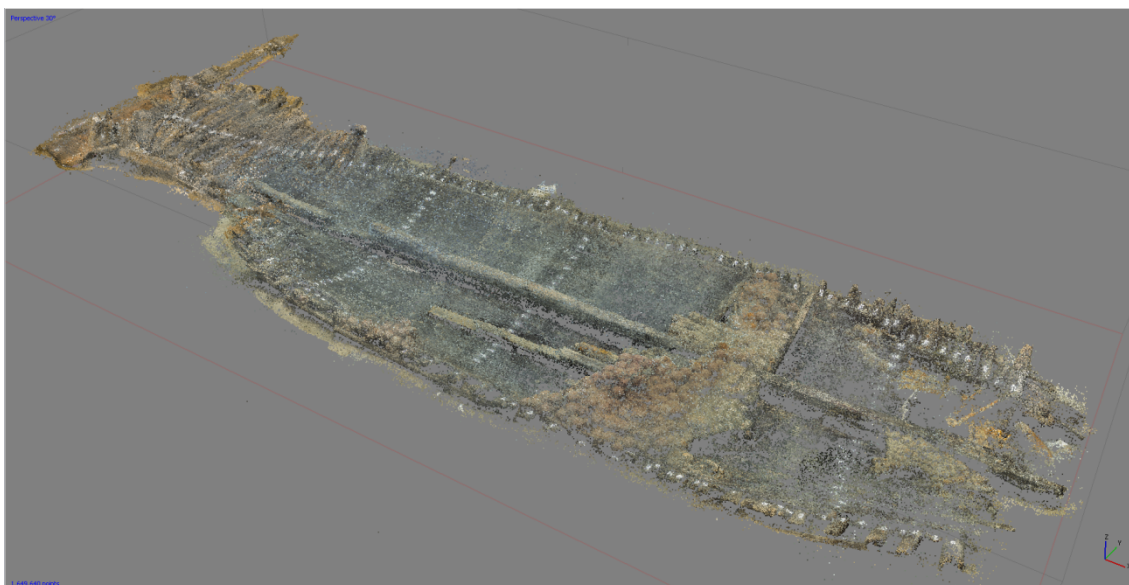


Ilustración 18 Nube dispersa de puntos Deltebre I. Fuente: elaboración propia.

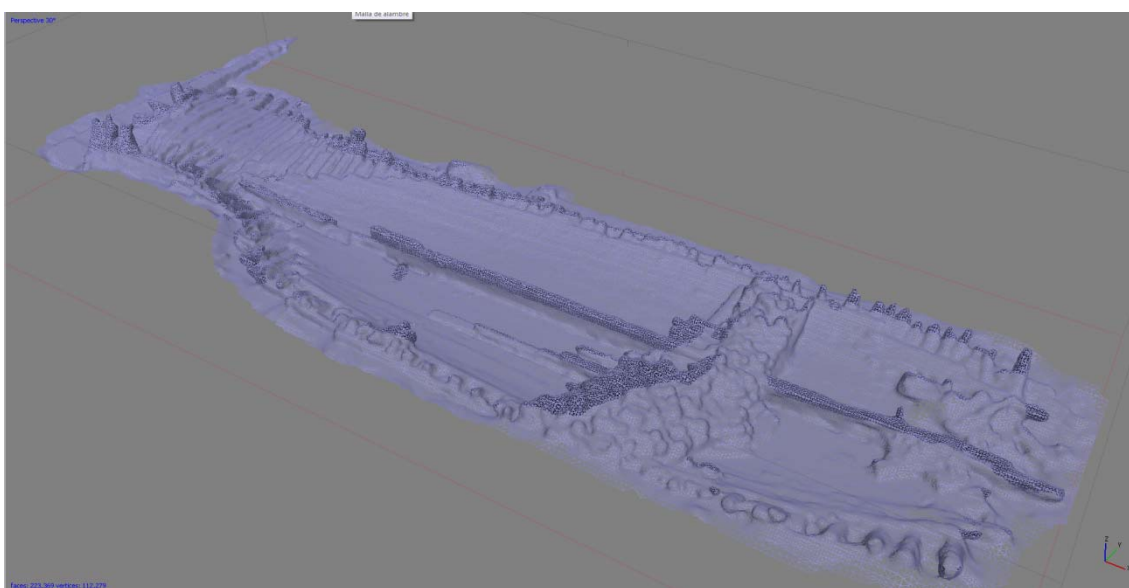


Ilustración 19 Malla del modelo 3D Deltebre I. Fuente: elaboración propia.

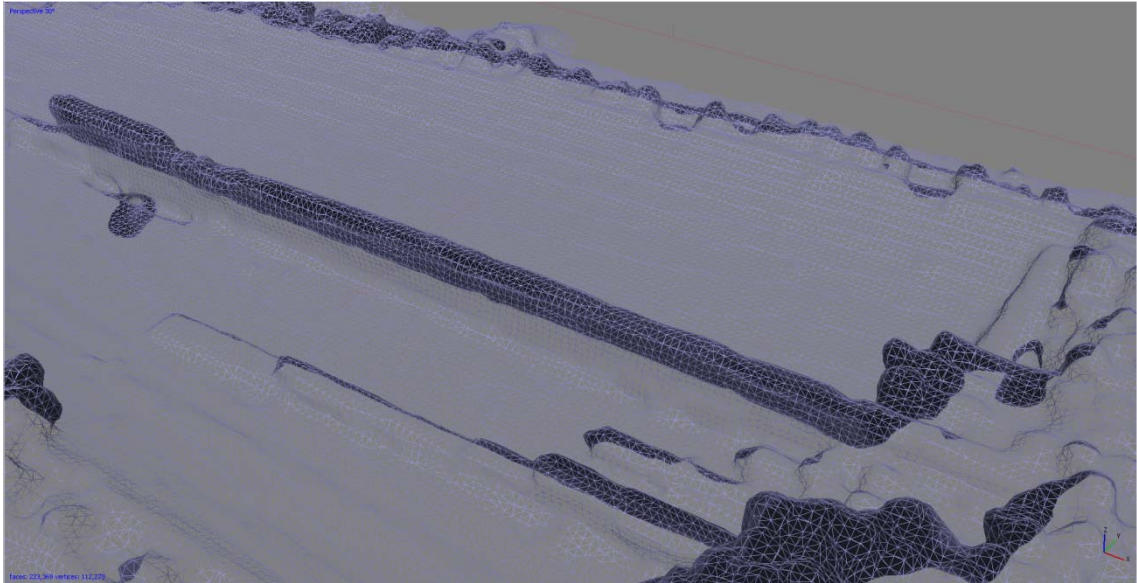


Ilustración 20 Detalle de la malla del modelo 3D Deltebre I. Fuente: elaboración propia.

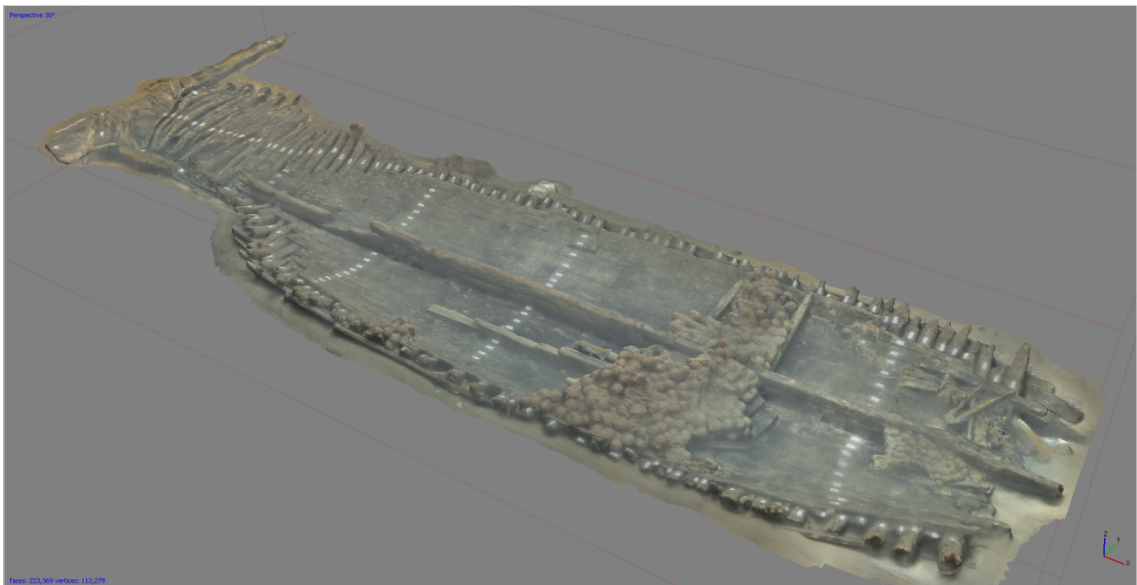


Ilustración 21 Modelo 3D con texturas Deltebre I. Fuente: elaboración propia.

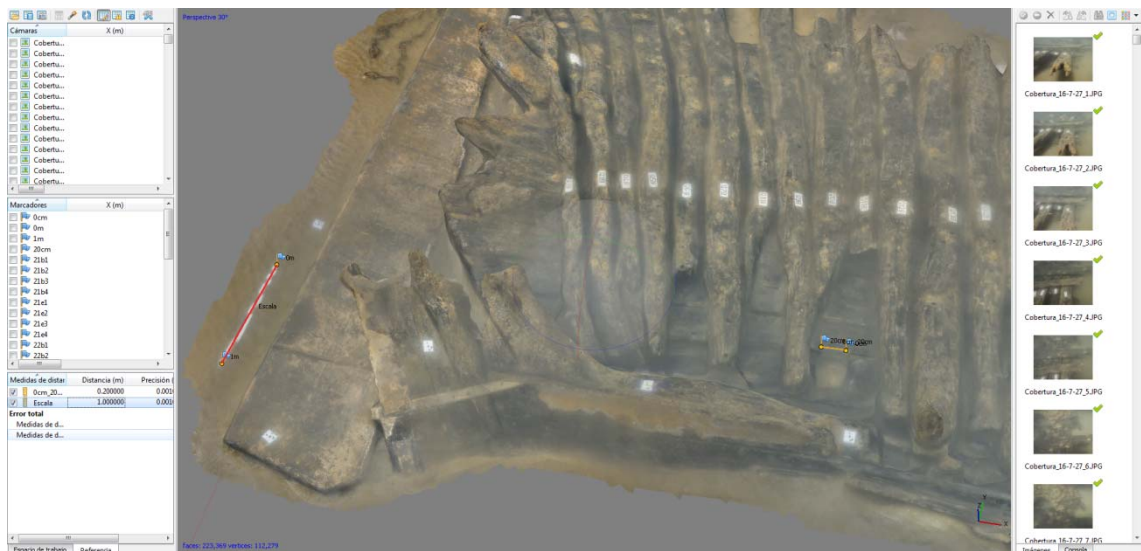


Ilustración 22 Establecimiento escalas métricas Deltebre I. Fuente: elaboración propia.



Ilustración 23 Ortofotografía resultante Deltebre I. Fuente: elaboración propia.

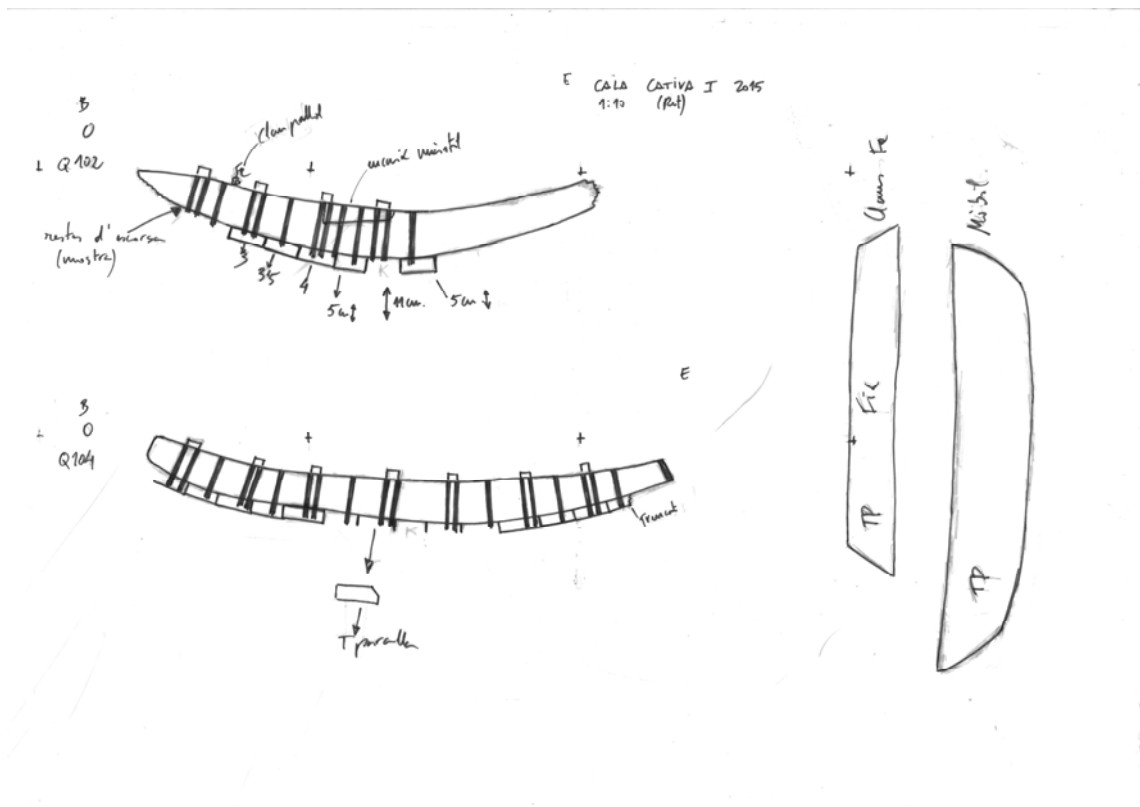


Ilustración 24 Dibujo arqueológico de las cuadernas Q102 y Q104 Cala Cativa 2015. Fuente: Rut Geli (CASC).

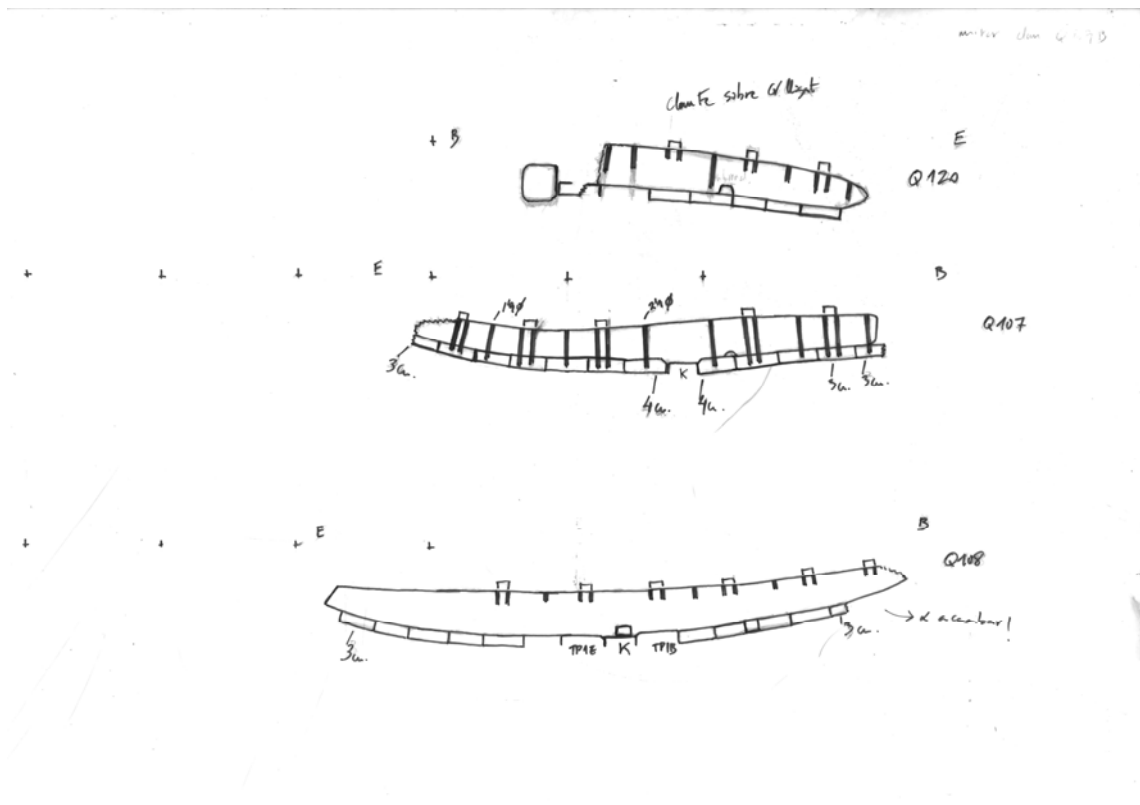


Ilustración 25 Dibujo arqueológico de las cuadernas Q107, Q108 y Q120 Cala Cativa 2015. Fuente: Rut Geli (CASC).

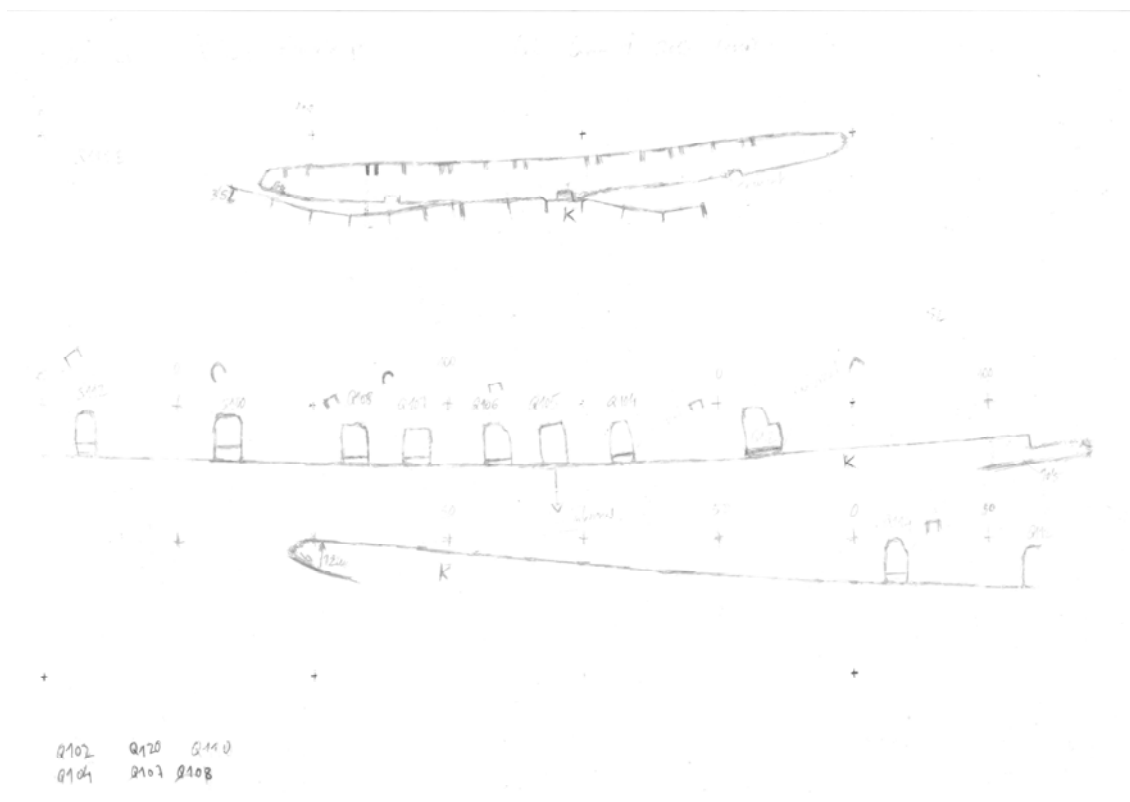


Ilustración 26 Dibujo arqueológico de las cuadernas Q110 y quilla Cala Cativa 2016. Fuente: Rut Geli (CASC).

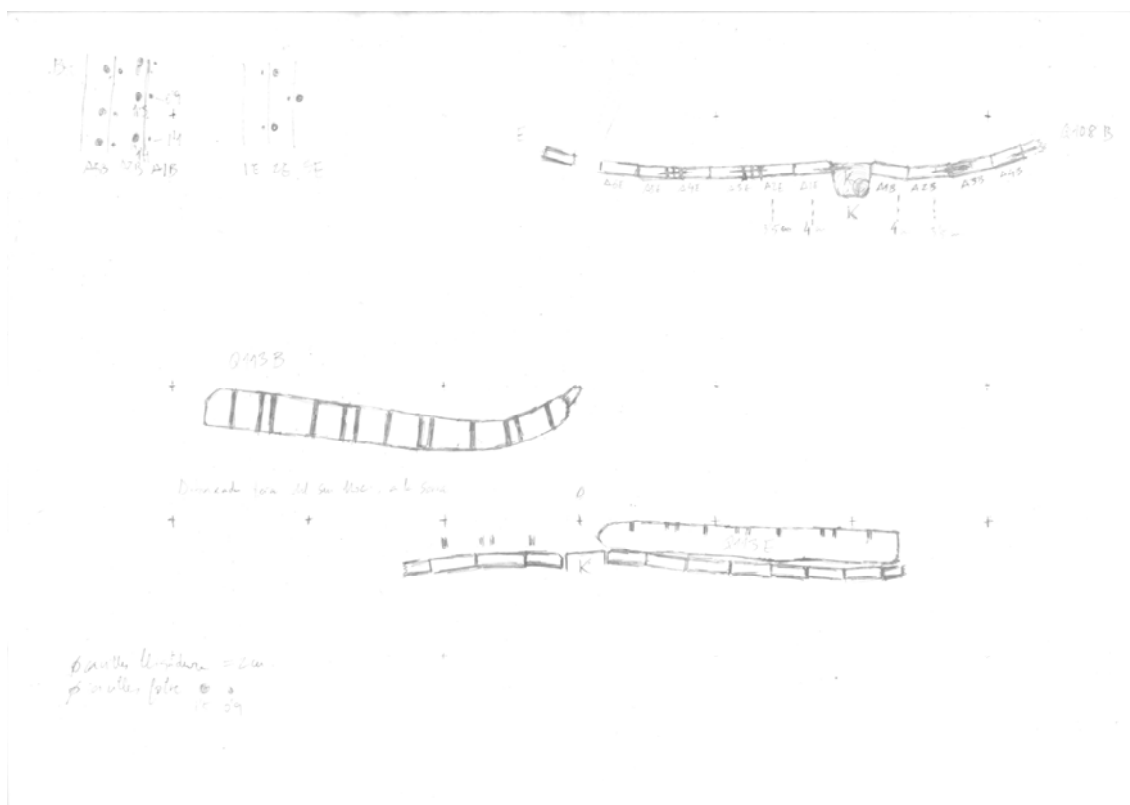


Ilustración 27 Dibujo arqueológico de la cuaderna Q113 Cala Cativa 2016. Fuente: Rut Geli (CASC).

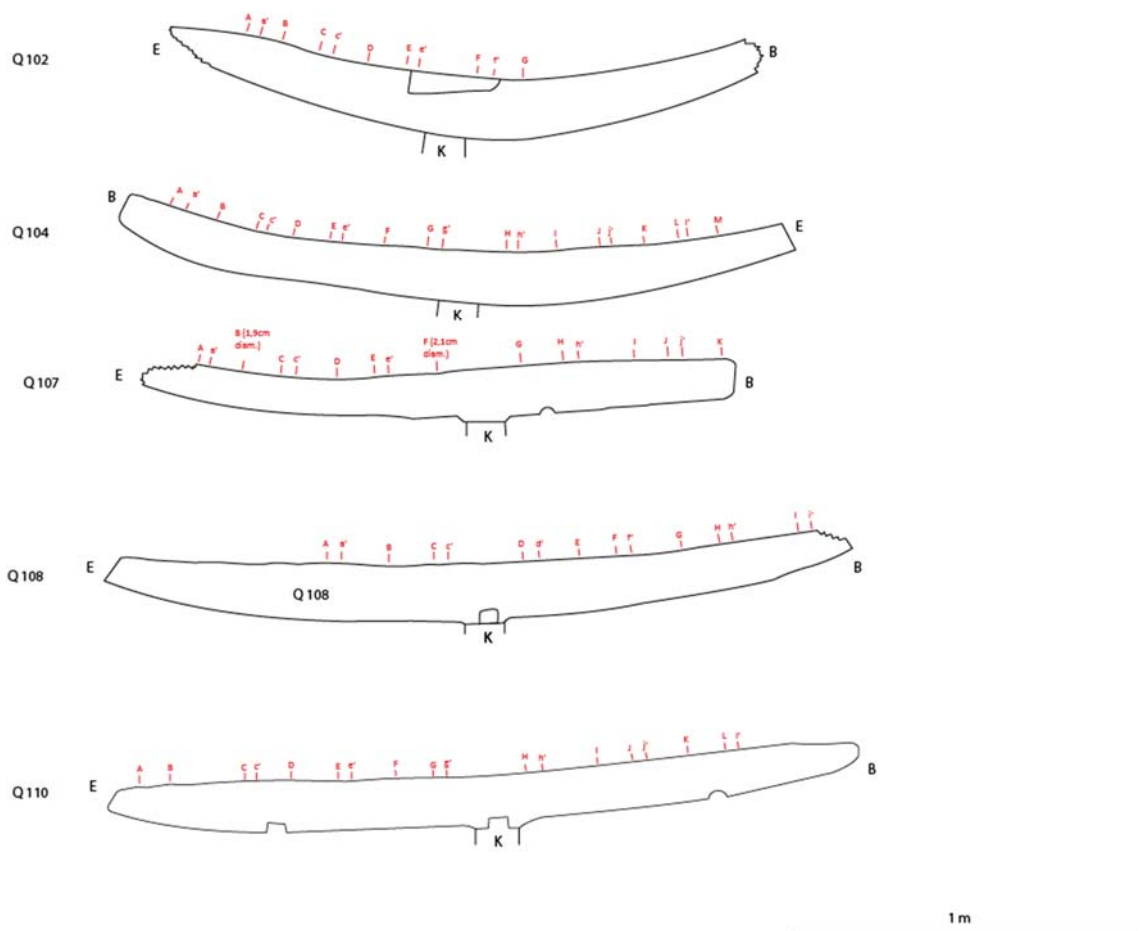


Ilustración 28 Digitalización de las cuerdas del dibujo tradicional, las letras en rojo marcan las cabillas y son algunos de los puntos que se emplearon para medir y realizar la comprobación métrica. Fuente elaboración propia.

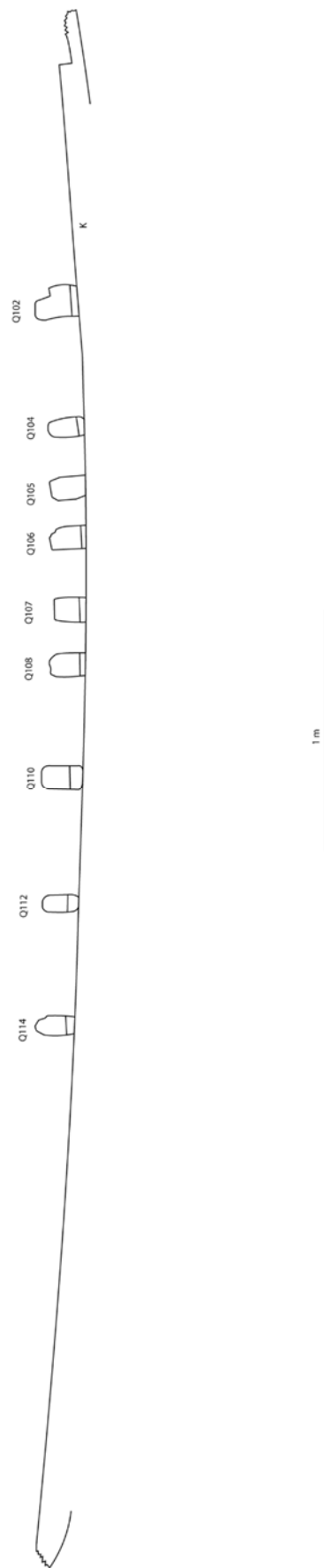


Ilustración 29 Digitalización de la quilla del dibujo tradicional. Fuente elaboración propia.



Ilustración 30 Digitalización de la cuaderna Q102 sobre fotogrametría de 2015. Fuente: elaboración propia.

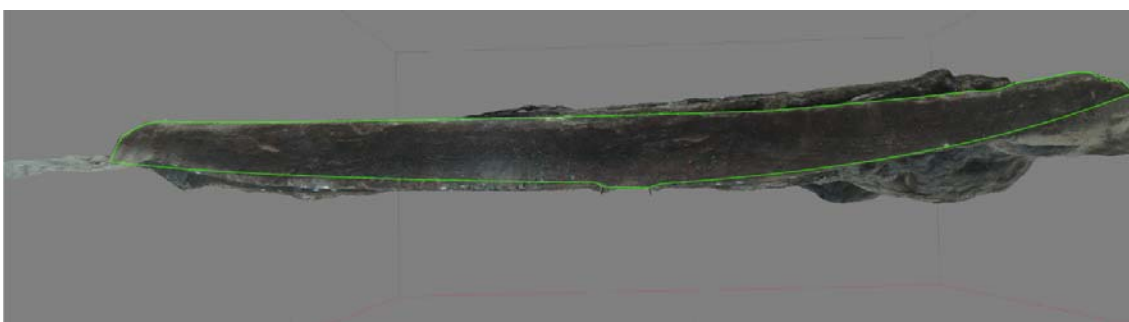


Ilustración 31 Digitalización de la cuaderna Q108 sobre fotogrametría de 2016. Fuente: elaboración propia.

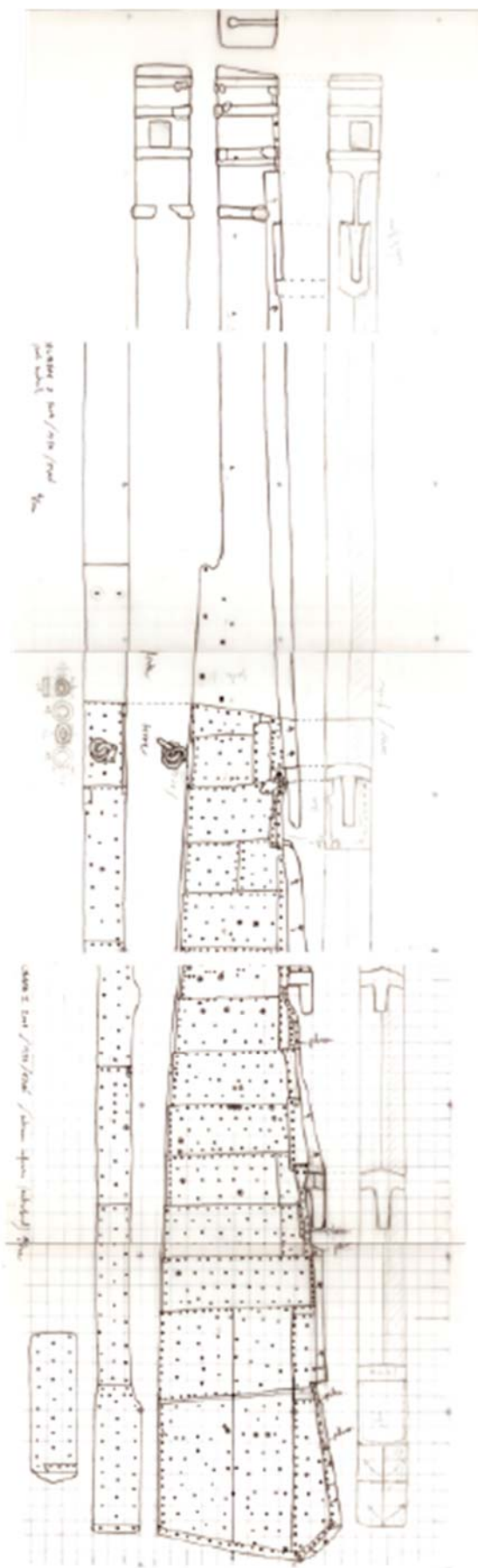


Ilustración 32 Dibujo arqueológico del timón Deltebre I. Fuente: Rut Geli (CASC).

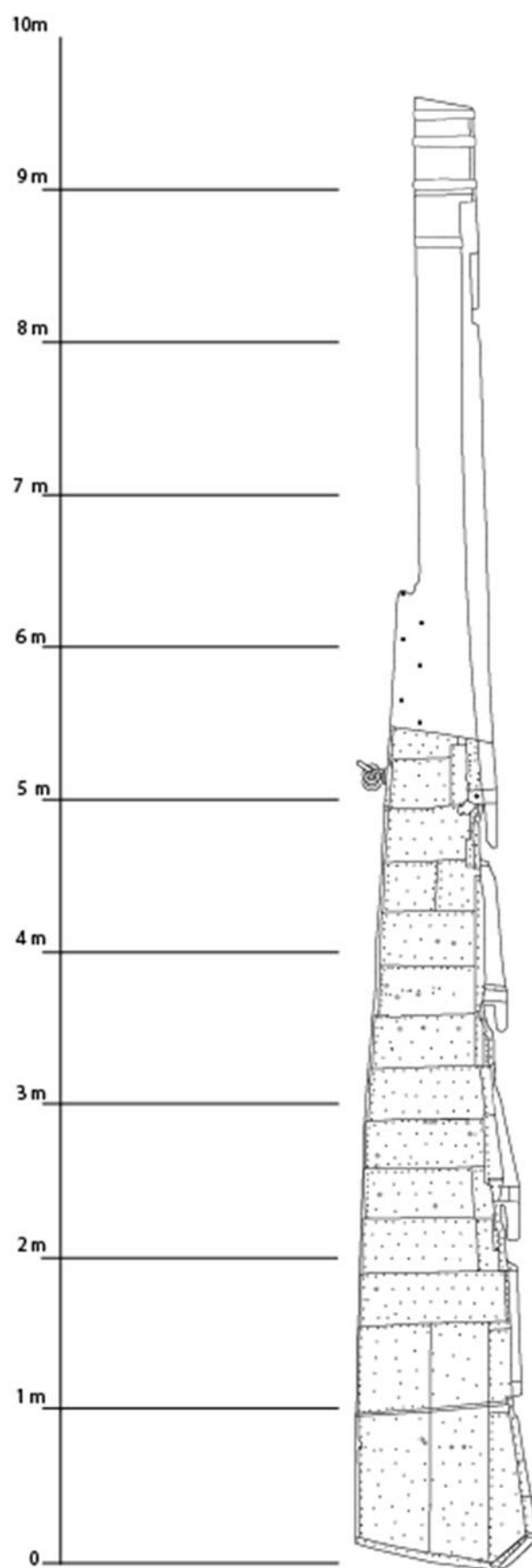


Ilustración 33 Digitalización del timón del dibujo tradicional con escala. Fuente: Rut Geli (CASC).

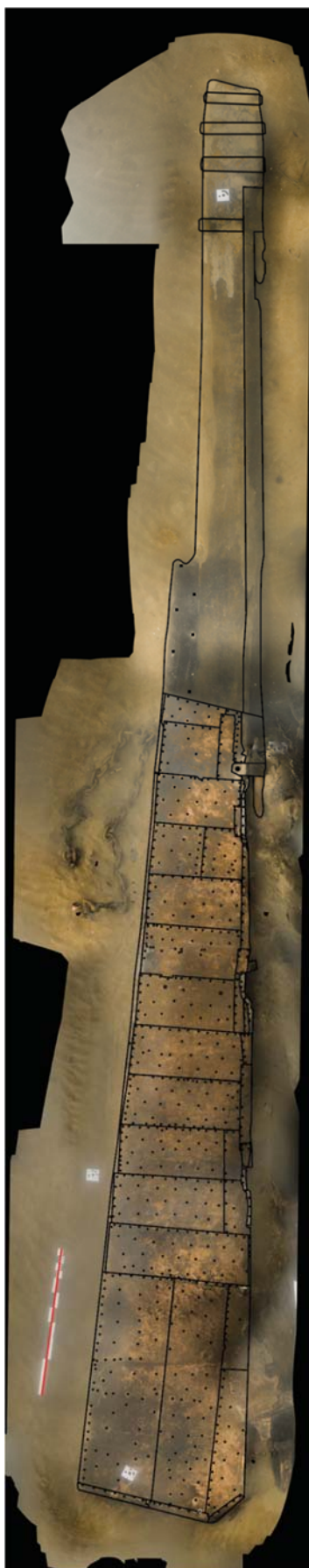


Ilustración 34 Digitalización realizada de ortofoto del timón con escala. Fuente: elaboración propia.

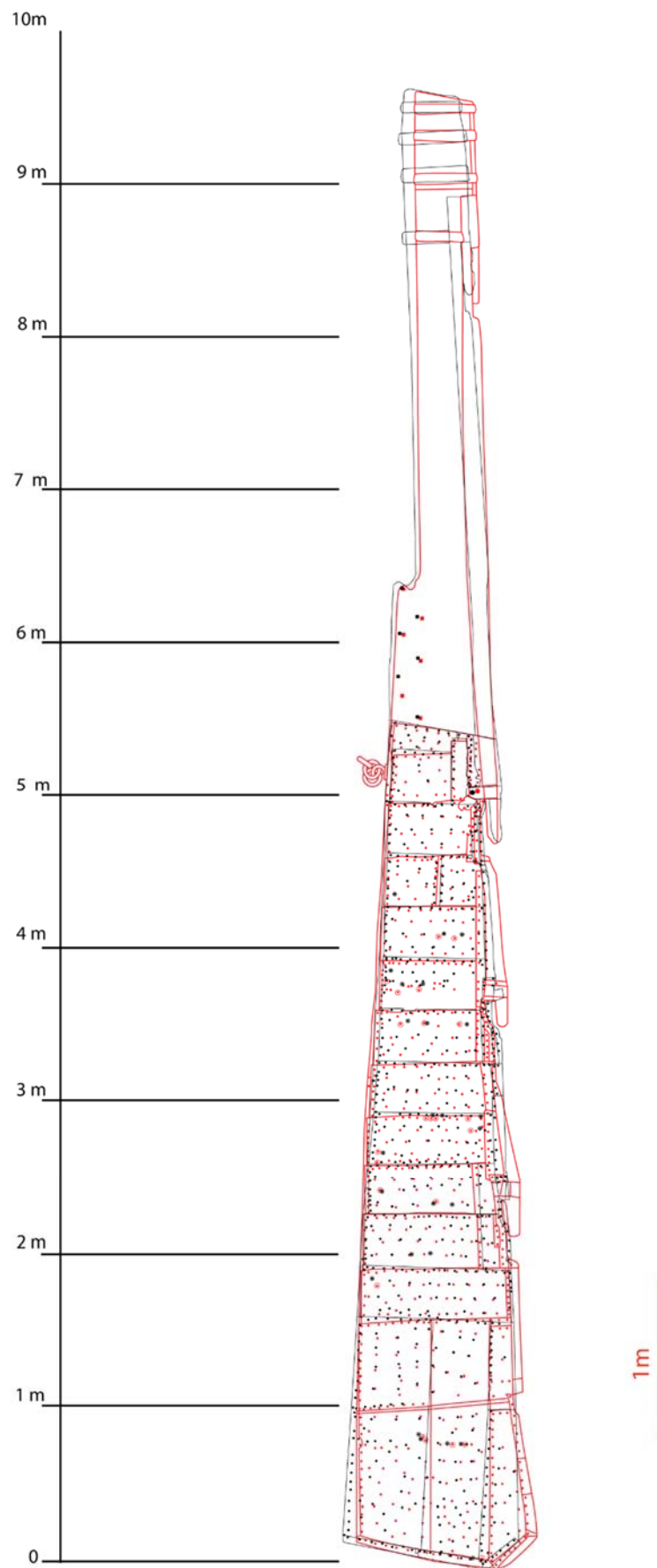


Ilustración 35 Superposición de la digitalización del dibujo tradicional (rojo) con el obtenido de la fotogrametría (negro). Fuente: elaboración propia basada en dibujo de Rut Geli (CASC).

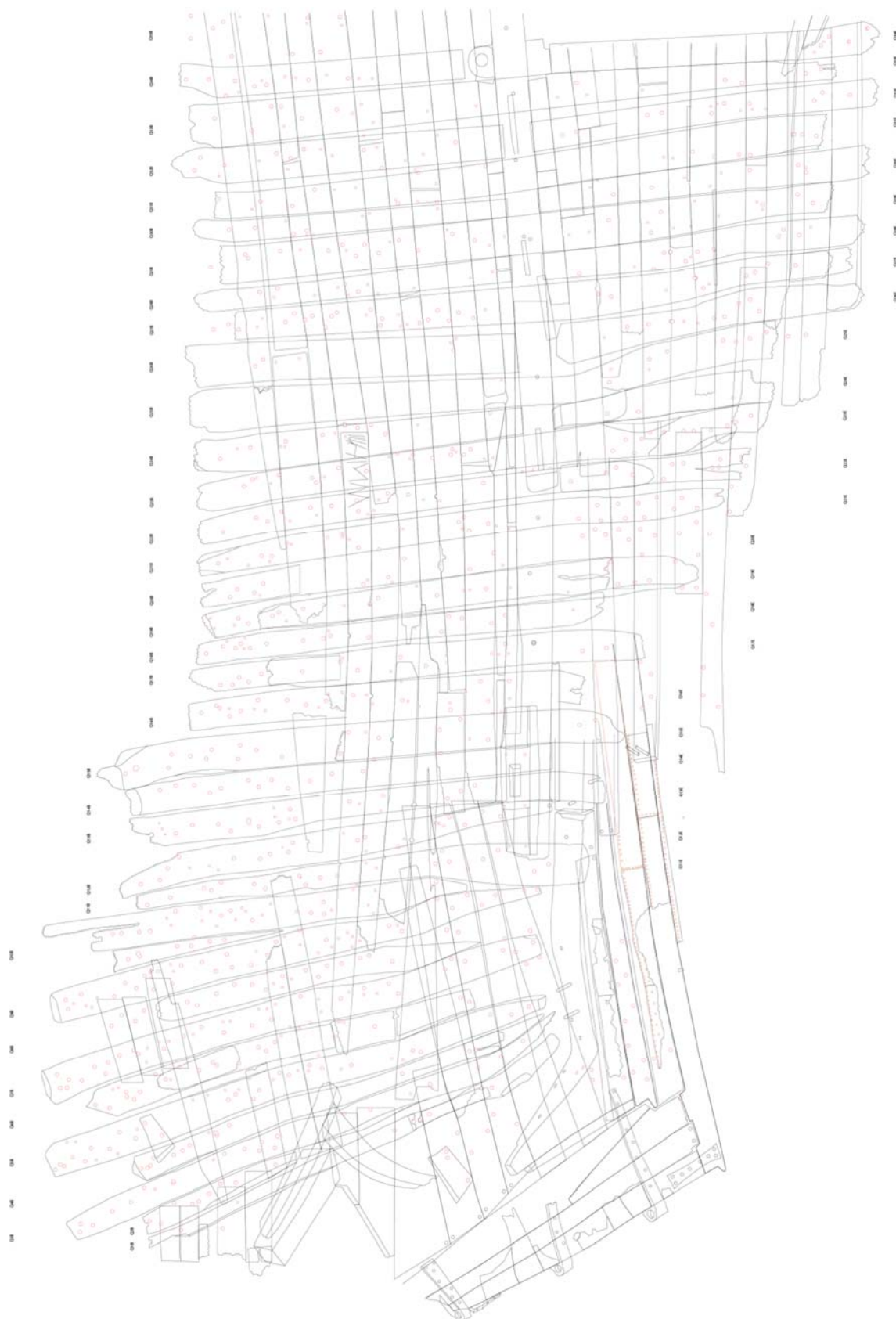


Ilustración 37 Digitalización del dibujo tradicional de la parte de popa Deltebre I. Fuente: Rut Geli (CASC).



Ilustración 38 Fotografía de la caña del timón de Deltebre I con abundantes partículas en suspensión en el agua (sin filtrar). Fuente Gustau Vivar (CASC).



Ilustración 39 Fotografía de la caña del timón de Deltebre I, podemos observar la gran cantidad de partículas en suspensión en el agua (filtrada). Fuente: elaboración propia basada en Gustau Vivar (CASC).

Diagrama de Bland-Altman

Método A	cm_en_dibujo
Método B	cm_en_fotogrametría
Diferencias	
Tamaño muestral	67
Media aritmética	0,2049
IC del 95 %	0,05905 a 0,3507
P (H_0 : media=0)	0,0066
Límite inferior	-0,9669
IC del 95 %	-1,2174 a -0,7164
Límite superior	1,3767
IC del 95 %	1,1262 a 1,6271
Coefficiente de repetibilidad	1,2304
IC del 95 %	1,0527 a 1,4807

Ilustración 40 Cálculos valores diagrama de *Bland-Altman* de Cala Cativa I. Fuente: elaboración propia.

Diagrama de Bland-Altman

Método A	cm_en_dibujo
Método B	cm_en_fotogrametría
Diferencias	
Tamaño muestral	32
Media aritmética	1,1067
IC del 95 %	-0,3875 a 2,6009
P (H_0 : media=0)	0,1410
Límite inferior	-7,0162
IC del 95 %	-9,5967 a -4,4356
Límite superior	9,2295
IC del 95 %	6,6490 a 11,8101
Coefficiente de repetibilidad	8,2839
IC del 95 %	6,6619 a 10,9571

Ilustración 41 Cálculos valores diagrama de *Bland-Altman* de Deltebre I. Fuente: elaboración propia.

